



Ana Virgínia Ferreira
Azevedo

Desempenho balístico de sistemas de proteção
com núcleos de MAC



**Ana Virgínia Ferreira
Azevedo**

**Desempenho balístico de sistemas de proteção
com núcleos de MAC**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Jorge Manuel Costa da Fonseca Justo
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Prof. Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias
Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Aqui ficam os agradecimentos a todos aqueles que me apoiaram para a realização deste trabalho,

Ao Professor Doutor Filipe Teixeira-Dias, pela sua orientação, amizade, disponibilidade, motivação e apoio em todos os momentos.

À Joana Sousa-Martins pelos dados cedidos, pela ajuda e disponibilidade sempre que precisei e pela sua amizade.

Ao Bruno, pela paciência, por toda a ajuda prestada e por estar sempre presente. Aos meus amigos, pelo carinho, compreensão e por estarem sempre presentes.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional.

Palavras-chave

impacto balístico; cortiça; projétil; limite balístico; simulação numérica; método dos elementos finitos; absorção de energia

Resumo

No presente trabalho estudou-se o desempenho balístico de dois micro-aglomerados de cortiça de diferentes densidades. O estudo de sistemas proteção balística contra diversos tipos de ameaça tem suscitado a curiosidade de diversos cientistas, sendo a sua principal função desenvolver sistemas de defesa que sejam eficazes sob qualquer tipo de ameaça. Para tal, os investigadores tentam encontrar novos materiais que tenham boas características mecânicas para o desenvolvimento de sistemas de proteção e defesa. Neste trabalho foram realizados testes reais com os dois micro-aglomerados de cortiça com espessuras diferentes e, posteriormente, foram validados os modelos desenvolvidos. Os resultados obtidos por simulação numérica através do Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa LS-DynaTM, mostram que estes coincidem com os resultados experimentais. Desenvolveu-se um estudo numérico detalhado das placas *sandwich* para os dois micro-aglomerados de cortiça onde se variou a espessura dos mesmos. Foram realizadas simulações, para análise qualitativa, com projéteis FSP bem como simulações, para análise quantitativa, com projéteis esféricos. No que diz respeito à capacidade de absorção de energia, os resultados obtidos experimentalmente e numericamente mostram que quanto maior é a espessura e a densidade do micro-aglomerado maior é a velocidade limite balístico e, conseqüentemente, maior a capacidade de absorção de energia do alvo. O valor máximo do limite balístico e também de absorção de energia ocorre para a placa de micro-aglomerado com massa volúmica 440 kg/m^3 e com uma espessura de 30 mm. Conclui-se também nesta dissertação que a absorção de energia para qualquer placa *sandwich* utilizada neste trabalho, independentemente da espessura ou densidade do micro-aglomerado de cortiça é sempre superior a 74% para o projétil esférico.

Keywords

ballistic impact; cork; projectile; ballistic limit, numerical simulation, finite element method; energy absorption

Abstract

The ballistic performance of two micro-agglomerates of cork with different densities was studied in the present work. The study of ballistic protection systems against various types of threats has sparked the curiosity of many scientists, whose main goal is to develop defence systems that are effective in any type of threat. To this end, researchers attempt to find new materials that have good mechanical characteristics for the development of defense and protection systems. Within the scope of this work actual tests with two micro-agglomerates of cork with different thicknesses were carried out and the subsequent models developed were validated. The results obtained by simulation with the finite element method using the LS-DynaTM software demonstrate that the models agree with the experimental results. A detailed numerical study of the sandwich plates was made for the two micro-agglomerates of cork in which the thickness was varied. Simulations were performed for qualitative analysis, with Fragment Simulating Projectiles (FSP) projectiles as well as simulations for quantitative analysis with spherical projectiles. The results obtained both experimentally and numerically show that the higher the thickness and density of the micro-agglomerate the higher is the resulting ballistic limit velocity and, consequently, the higher the energy absorption capacity of the target. The maximum value of the ballistic limit and also of energy absorption occurs for the micro-agglomerate of cork with a density of 440 kg/m^3 and a thickness of 30 mm. In all the sandwich plates used in this thesis, regardless of the thickness or density of the micro-agglomerate of cork, the energy absorption was always above 74% for the spherical projectile.

Conteúdo

I	Objetivos e Enquadramento	1
1	Objetivos	3
2	Guia de Leitura	5
3	Enquadramento	7
3.1	A Balística	7
3.1.1	Projéteis	8
3.1.2	Modos de perfuração de um alvo	10
3.1.3	Métodos de análise dos processos de perfuração	11
3.1.4	Estado da arte	11
3.2	A Cortiça	13
3.2.1	Micro-aglomerado de cortiça	14
3.2.2	Estruturas <i>Sandwich</i>	15
II	Testes Reais	21
4	Análise Experimental	23
4.1	Introdução	23
4.2	Alvo: Placa <i>Sandwich</i> e Aço Balístico	24
4.3	Alvo: Placa <i>Sandwich</i>	24
5	Resultados e Discussão	29
5.1	Determinação do limite balístico	29
5.2	Resultados Experimentais	30
5.2.1	Alvo: placa <i>sandwich</i> e aço balístico	30
5.2.2	Alvo: Placa <i>sandwich</i>	32
III	Modelação Numérica	41
6	Procedimentos e Métodos	43
6.1	Método dos Elementos Finitos	43
6.2	Modelos de elementos finitos do alvo	44
6.3	Modelos de elementos finitos do projétil	48
6.4	Contactos e Condições de fronteira	49

7	Resultados e Discussão	53
7.1	Alvo: placa <i>sandwich</i> e aço balístico	53
7.2	Alvo: placa <i>sandwich</i>	53
IV	Considerações Finais	61
8	Considerações Finais	63
8.1	Conclusões finais	63
8.2	Perspectivas e sugestões de trabalho futuro	64

Parte I

Objetivos e Enquadramento

Capítulo 1

Objetivos

O trabalho que aqui se apresenta enquadra-se nas áreas genéricas da utilização, desenvolvimento e implementação de modelos de comportamento de materiais para a simulação numérica, recorrendo ao método dos elementos finitos, de fenómenos de dinâmica de impacto (balística terminal). Neste âmbito e com este fim foi utilizado o programa de análise pelo método dos elementos finitos LS-DynaTM.

De forma genérica, o trabalho que aqui se propõe consiste no estudo do comportamento de sistemas estruturais tipo *sandwich* para proteção balística que incorporem núcleos de diversos tipos/configurações de micro-aglomerados de cortiça (MAC). Os modelos de comportamento dos materiais serão determinados por via experimental e implementados numericamente a partir de modelos teóricos e/ou analíticos.

Assim, de uma forma estruturada, os objetivos do trabalho aqui proposto são os seguintes:

- Desenvolvimento de capacidade de utilização de *software* de simulação pelo método dos elementos finitos em situações de dinâmica de impacto de alta energia e alta velocidade;
- Conhecimento dos princípios básicos da dinâmica de impacto e, em particular, da balística terminal;
- Estudo do efeito da utilização de materiais celulares em sistemas de proteção e determinação do seu desempenho balístico;
- Estudo do efeito da espessura dos micro-aglomerados de cortiça na capacidade de proteção de alvos de estruturas *sandwich* com núcleos de micro-aglomerado de cortiça;
- Estudo do efeito da densidade dos núcleos de MAC na capacidade de proteção (absorção de energia) recorrendo a densidades distintas;
- Determinação por via numérica/experimental do índice balístico e da velocidade V_{50} de painéis de proteção com núcleos de MAC.

Capítulo 2

Guia de Leitura

Esta dissertação de mestrado é composta por oito capítulos, distribuídos e organizados em quatro partes. Neste capítulo é apresentado um breve resumo dos conteúdos de cada capítulo, por forma a permitir ao leitor um guia rápido e prático.

Capítulos 1, 2 e 3 — Objetivos e Enquadramento

No primeiro capítulo desta dissertação são expostos os objetivos do trabalho. No Capítulo 2 é apresentado este guia de leitura. No Capítulo 3 deste trabalho são apresentados os tópicos envolvidos e tratados durante o decorrer desta dissertação. É referido uma breve descrição da balística bem como placas *sandwich* e descreve-se mais especificamente a cortiça e suas potencialidades. É também incluída nesta parte uma revisão bibliográfica referente a trabalhos de investigação que se enquadrem neste trabalho.

Os capítulos seguintes são destinadas aos testes reais bem como à caracterização dos materiais tanto do projétil como do alvo na modelação numérica da performance balística, assim como o desenvolvimento de todo este processo de simulação numérica.

Capítulo 4 — Testes Reais

No presente capítulo são apresentados os procedimentos experimentais para os dois grupos de simulações realizadas bem como um esquema do procedimento experimental.

Capítulo 5 — Resultados e Discussão

Neste capítulo do trabalho são apresentados os resultados experimentais obtidos para diferentes espessuras das placas de cortiça micro-aglomerada e para diferentes densidades do micro-aglomerado. Também são apresentados os resultados para os dois projéteis utilizados. São apresentados os valores do limite balístico V_{50} calculados através dos métodos de STANAG 2920 e também pelo método de Lambert, métodos estes que serão explicados neste trabalho. São também analisados os parâmetros de absorção de energia por parte do alvo durante o impacto.

Capítulo 6 — Modelação Numérica

Neste capítulo descreve-se o programa de simulação numérica utilizado ao longo do presente trabalho, o LS-DynaTM. Apresentam-se também os princípios básicos do Método dos Elementos Finitos (MEF). É também neste capítulo que se realizam as simulações numéricas. São apresentadas as especificações pré-definidas, isto é, realizam-se simulações para diferentes espessuras do micro-aglomerado de cortiça e para ambos os projéteis. Definem-se os modelos de materiais, condições de fronteira e simetria e outras condições para a obtenção dos resultados numéricos.

Capítulo 7 — Resultados e Discussão

Neste capítulo são confrontados e discutidos os resultados obtidos através das simulações numéricas realizadas, considerando o alvo como uma estrutura deformável, e o projétil rígido.

Capítulo 8 — Considerações Finais

Neste ultimo capítulo apresentam-se as conclusões gerais e discutem-se os resultados obtidos na realização deste trabalho. Também são sugeridas propostas para trabalho futuro.

Capítulo 3

Enquadramento

Na primeira parte desta dissertação apresentam-se os tópicos envolvidos e tratados durante o desenvolvimento do trabalho e explicam-se os conceitos relativos ao impacto balístico. Referem-se os materiais utilizados em situações de impacto e descrevem-se, de forma mais detalhada, a cortiça e as suas potencialidades neste tipo de aplicações. É também incluída nesta parte uma revisão bibliográfica referente a trabalhos de investigação realizados que se enquadram no âmbito deste trabalho.

3.1 A Balística

A ciência que estuda o movimento de corpos lançados ao ar livre é designada por balística. Esta ciência está normalmente relacionada com o disparo de projéteis por armas de fogo, onde se distinguem os movimentos em três partes distintas: a balística interior, exterior e a terminal. A balística interior, ou interna, está relacionada com os fenómenos que ocorrem dentro do cano da arma de fogo até ao momento em que o projétil a abandona. Os estudos que se podem realizar estão relacionados com a temperatura, volume e pressão dos gases no interior da arma durante a explosão do material combustível, bem como a aceleração sofrida pelo projétil, a vibração do cano, a geometria da arma e do projétil. O segundo movimento, a balística exterior (ou externa), ocorre desde o instante que o projétil abandona a arma até ao instante em que atinge o alvo. Este movimento estuda as forças que atuam nos projéteis e, consequentemente, o seu movimento durante o percurso de voo. O calibre, formato, massa, velocidade inicial e rotação são fatores determinantes para o desenvolvimento de um projétil com um grande poder de destruição. Dois dos fatores mais importantes são a massa e a velocidade, uma vez que recorrendo ao cálculo da energia cinética é possível obter uma maximização da energia, permitindo assim um melhor resultado do ponto de vista do ataque.

No presente trabalho, a fase mais importante é a balística terminal, que estuda a interação do projétil com o alvo. Por este facto, será dada mais relevância a esta fase.

A balística terminal, ou de efeitos, é a ciência que estuda todos os fenómenos que ocorrem quando um projétil atinge um alvo. Esta área de estudo da balística diz respeito aos fenómenos que ocorrem durante o impacto do projétil com o alvo. O estudo da balística terminal envolve muitas formas empíricas. Porém, estudos teóricos são realizados também para maximizar a penetração, permitir ou não a fragmentação do projétil ao atingir o alvo, a utilização ou não de apetrechos explosivos nos extremos do projétil,

aumentando desta forma sua capacidade de destruição, *etc.*

Têm havido grandes avanços no estudo da balística graças ao desenvolvimento de câmaras de alta velocidade e do estroboscópio, que têm permitido o estudo aprofundado do movimento de projéteis desde o momento em que são disparados até o instante em que atingem o alvo. Estes estudos são feitos através da inclusão destes dados em supercomputadores que permitem a otimização de armas e projéteis. Os efeitos dos projéteis no ponto de chegada ao alvo são diversos, dependendo da sua trajetória, de fatores externos, do tipo de estrutura e material do alvo (madeira, metal, tecido humano, *etc.*), fazendo com que os efeitos causados sejam maiores ou menores.

3.1.1 Projéteis

O projétil é um dos quatro componentes principais de uma munição moderna, sendo os outros componentes o fulminante (ou espoleta), a cápsula (ou estojo) e a pólvora (ou propelante).

Os primeiros projéteis eram construídos em pedra. Porém, com o passar do tempo e com o avanço da tecnologia, passaram a ser construídos em metal comum, como por exemplo o ferro. No entanto, o ferro é relativamente pouco denso, perdendo velocidade ao longo do percurso e, conseqüentemente, diminuindo a energia cinética muito mais rapidamente do que com um projétil mais pesado.

Uma velocidade baixa pode ser compensada com o aumento da massa, fazendo assim aumentar o valor da energia cinética. Daqui se concluiu que os projéteis deveriam, idealmente, ser construídos em chumbo, uma vez que este material tem um ponto de fusão baixo em comparação com o metal comum referido anteriormente, o ferro, e uma densidade elevada.

Nos parágrafos seguintes descrevem-se os projéteis utilizados no âmbito deste trabalho.

Projéteis FSP

Os projéteis FSP (*fragment simulating projectiles*) são utilizados apenas em testes de laboratório, e servem para estudar o efeito do impacto de fragmentos. A fragmentação é um processo pelo qual, por exemplo, o invólucro de bombas e granadas é quebrado pela explosão de um detonante interno. Os fragmentos (termo técnico) podem ter várias formas pré-definidas tais como, por exemplo, esferas, cubos, cilindros, *etc.*, embora também se passe a designar por fragmentos as lascas ou estilhaços. Os fragmentos pré-formados são colocados dentro de uma matriz até ao momento onde ocorre a detonação a alta velocidade. De forma a estandardizar os efeitos de impacto dos estilhaços, foram criadas normas para a produção deste tipo de projéteis, sendo a norma MIL-DTL-46593B (ARL, 2006) atualmente utilizada pelas forças armadas norte-americanas para a produção dos projéteis FSP. Os testes realizados com este tipo de projéteis incidem na verificação do comportamento de materiais em coletes de proteção (Wambua et al., 2007) e capacetes militares. Os metais ou cerâmicos podem ser utilizados em coletes leves, fornecendo proteção adicional contra disparos (Iremonger and Went, 1996) e os componentes metálicos ou camadas de fibras podem dar resistência contra ataques de facas e armas semelhantes.

A norma norte-americana referida anteriormente especifica as dimensões, massa e

material utilizado na construção destes projéteis. Neste trabalho foram usados projéteis FSP quando o alvo é a placa *sandwich* com diferentes espessuras do micro-aglomerado de cortiça e uma placa de aço balístico. As características do projétil FSP estão listadas na tabela 3.1. Na imagem da figura 3.1 é apresentado o desenho de definição do projétil utilizado neste trabalho, o projétil FSP de calibre 0,50".

Tabela 3.1: Características do fragmento simulado (projétil FSP) segundo a norma MIL-DTL-46593B.

Calibre	Diâmetro [mm]	Comprimento de referência [mm]	Massa [g]
0,50	12,6	14,7	13,4

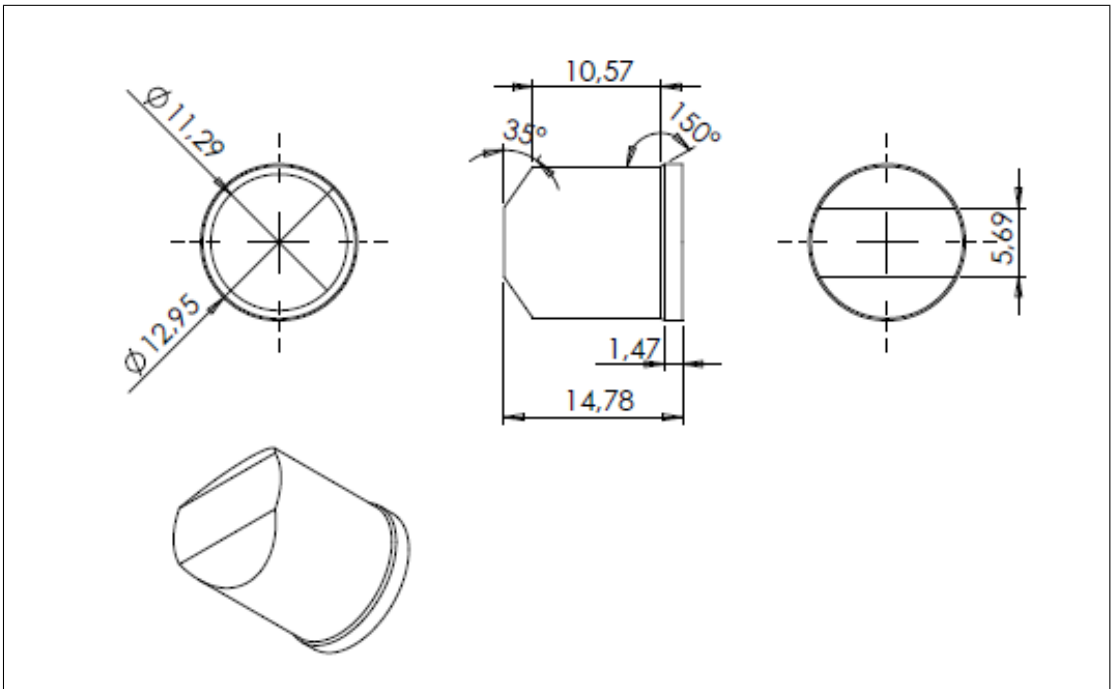


Figura 3.1: Desenho de definição do projétil FSP de calibre 0,50" utilizado no âmbito deste trabalho.

Projéteis Esféricos

No presente trabalho foram também realizadas testes com projéteis esféricos em alvos com a placa *sandwich* com diferentes espessuras do micro-aglomerado de cortiça. Na tabela 3.2 encontram-se as características do referido projétil.

Tabela 3.2: Características do projétil esférico utilizado neste trabalho.

Calibre	Diâmetro [mm]	Massa [g]	Densidade [kg/m³]
5.7	4,37	0,3399	8000

3.1.2 Modos de perfuração de um alvo

Depois de disparado o projétil, existe sempre a possibilidade de este atingir o alvo. Alguns dos modos de falhas que ocorrem durante o impacto podem levar à perfuração. Segundo Zukas et al. (1982) (Grytten et al., 2009a), os diversos modos de falhas dependem de variáveis importantes tais como, por exemplo, as propriedades dos materiais, a velocidade de impacto, a forma da ponta do projétil, a geometria do alvo e as condições de apoio e fixação do alvo. O alvo pode ou não romper dependendo da combinação das variáveis enumeradas anteriormente. No entanto, existe frequentemente perfuração. O ato de perfuração ocorre quando o projétil empurra (deforma) uma parte do material do alvo, normalmente de diâmetro aproximadamente igual ao do projétil, sendo frequente este tipo de rutura em projéteis com pontas achatadas. A forma de rutura em rolha (*plug*) depende do estado triaxial de tensão que se venha a desenvolver no alvo. Se ocorrer um estado de tensão de corte puro na parte posterior do projétil então é expelida uma rolha de material do alvo. Outro modo de perfuração é a formação de pétalas. Este modo ocorre quando a tensão de cedência é ultrapassada na parte contrária do alvo onde ocorreu o impacto e ocorre uma fratura em forma de estrela à volta do projétil. Na figura 3.2 são mostrados os modos mais comuns de rutura de um alvo num impacto balístico.

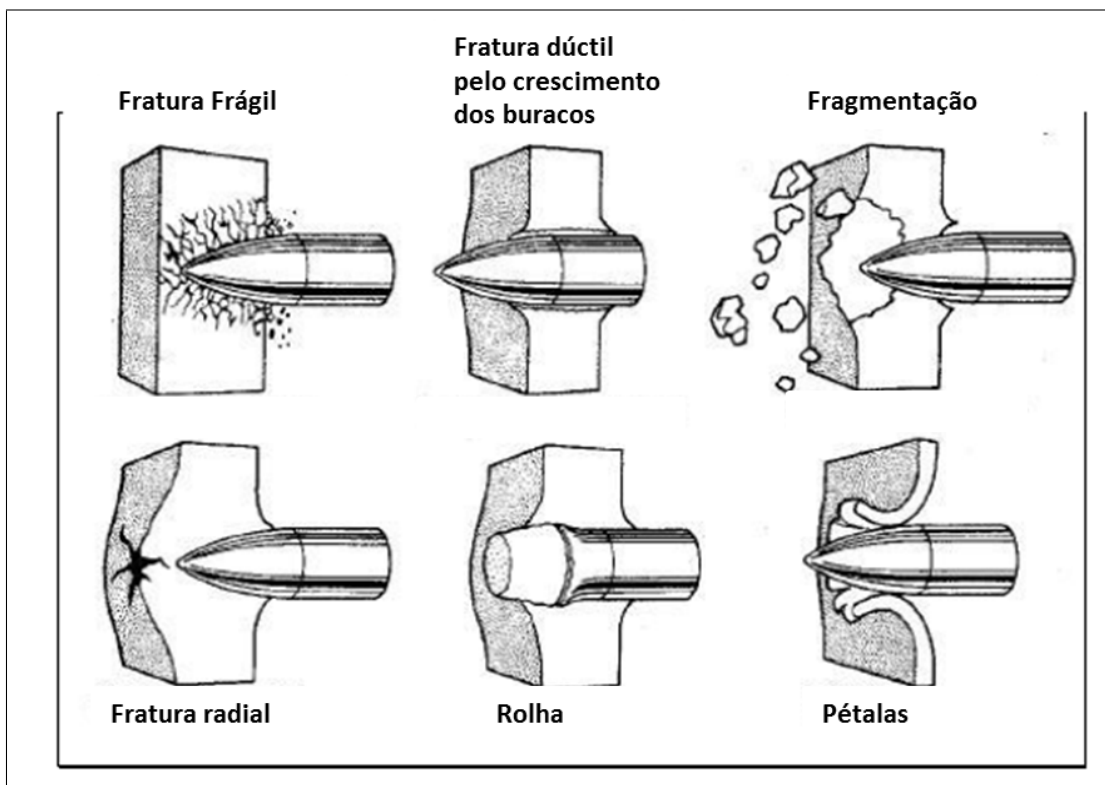


Figura 3.2: Representação esquemática dos modos mais comuns de perfuração num impacto balístico (Broughton et al., 2002).

3.1.3 Métodos de análise dos processos de perfuração

Existem três procedimentos possíveis para análise de perfuração em alvos. O primeiro consiste na abordagem experimental ou empírica, onde são obtidas e correlacionadas grandes quantidades de dados, que podem ser relacionadas através da formulação de equações algébricas simples. Este procedimento é válido para problemas específicos. No entanto, recorrendo a este método, torna-se complexo (ou mesmo impossível) extrapolar informação para diferentes materiais, geometrias ou velocidades de impacto.

A segunda abordagem consiste no desenvolvimento e utilização de modelos analíticos que se baseiem em pressupostos simples tais como, por exemplo, o projétil ser rígido, ou a inexistência de efeitos térmicos no alvo, *etc.* A dificuldade desta abordagem é o facto de se basear em parâmetros de materiais que muitas vezes não estão disponíveis ou não são mensuráveis.

A última categoria de métodos de análise de perfuração tem como base a utilização de métodos numéricos e de simulação numérica. Apesar de, por vezes, os resultados não serem quantitativamente corretos, estes métodos fornecem frequentemente respostas fiáveis sendo, por isso, abordagens bastante robustas.

Cada um dos métodos descritos nos parágrafos anteriores apresentam vantagens e desvantagens. Uma vez que nenhum deles apresenta toda a informação necessária, normalmente, a combinação destes métodos é muitas vezes a melhor abordagem. A aplicação bem sucedida destes métodos depende da boa compreensão dos princípios básicos como as leis de conservação de energia, a influência da inércia e a compreensão dos modelos de comportamento dos materiais envolvidos. Sem este conhecimento, qualquer método utilizado irá certamente falhar (Grytten et al., 2009a).

3.1.4 Estado da arte

Atualmente existe uma preocupação acrescida na escolha do melhor material de proteção balística, para permitir uma melhor mobilidade mantendo a segurança dos seus utilizadores. Por este motivo são realizados muitos estudos nesta área.

Nas últimas décadas, muitos têm sido os estudos realizados sobre os problemas estruturais no impacto balístico. Contudo, os processos de penetração e perfuração de alvos metálicos são processos de análise muito complexos, quer de um ponto de vista experimental, analítico ou até mesmo numérico. Para validar cálculos teóricos e modelos numéricos, é bastante útil a realização de testes de perfuração quase-estáticos, onde algumas incertezas associadas ao material, como características que influenciam a inércia ou propriedades relacionadas com as velocidades de deformação, são difíceis de obter. No entanto, não é possível estabelecer soluções analíticas totalmente fiáveis para problemas estruturais. Com a ajuda do Métodos dos Elementos Finitos (MEF), na simulação numérica, os problemas têm vindo a ser solucionados mais facilmente. Para validar este procedimento são necessárias medidas exatas (experimentais) de processos de deformação.

Para o cálculo da energia absorvida num impacto balístico têm sido utilizados diversos modelos. Em 1948, Taylor estudou o trabalho realizado na penetração de um alvo por um projétil assumindo uma expansão radial de um furo cilíndrico com um diâmetro igual ao do projétil (Taylor, 1948). Poucos anos mais tarde, Thompson (Thomson, 1955), melhorou o modelo referido, com a diferença de incluir o trabalho despendido na formação da concavidade do material do alvo quando penetrado por projéteis rígidos.

Foram poucos os investigadores que focaram a sua atenção no estudo do efeito das propriedades mecânicas no desempenho balístico. A título de exemplo, refere-se o estudo do efeito do módulo de Young nos esforços de impacto em alvos de liga de alumínio 2024, discutido por Sinhá et al. em 1977 (Sinha et al., 1977). Tate, no mesmo ano, assumiu que a força de fluxo é três vezes superior à tensão limite de elasticidade do material do alvo. Woodward em 1977 (Woodward, 1977), propôs um critério de comparação de seleção de materiais, para sistemas metálicos de proteção balística. Para diferentes tipos de materiais, o critério baseou-se nas suas propriedades físicas e mecânicas. Segundo este estudo, as ligas de Titânio e aço Hadfield parecem ser as mais vantajosas no que diz respeito à performance balística. Por outro lado, Manganelo e Abbott (Manganello and Abbot, 1972) estudaram a influência das propriedades do aço em sistemas de proteção, quando submetidos a impactos de baixa velocidade, concluindo que a dureza é a propriedade que mais afeta a performance balística.

A determinação do desempenho do impacto de projéteis em alvos planos foi estudada em função da tensão limite de elasticidade por muitos autores. No entanto, apenas alguns observaram que o simples facto de aumentar a resistência mecânica não leva ao melhoramento do desempenho balístico de um determinado material. O uso de métodos computacionais tem sido pouco utilizado devido à complexidade dos estudos. Por este motivo, muitos dos trabalhos realizados nesta área foram apenas experimentais, especialmente os realizados até meados da década de 80 do Século XX. A partir desta data começaram a surgir mais estudos analíticos.

Como já foi referido, o cálculo balístico pode recair sobre uma das seguintes categorias: (i) determinação de equações empíricas, (ii) desenvolvimento de modelos analíticos ou (iii) realização de simulação numérica. Os autores Bishop et al. (Bishop et al., 1945), Hill (Hill, 1950) e Goodier (Goodier, 1965) realizaram várias tentativas para determinar a resistência necessária para evitar a penetração de alvos metálicos, através do cálculo de pressões críticas necessárias para expandir a cavidade de impacto do projétil. Mais tarde, Forrestal et al. (Warren and Poormon, 2001) utilizaram a teoria da expansão de uma cavidade (*CET — Cavity-Expansion Theory*) para calcular a profundidade de penetração e a resistência na perfuração de diversos materiais. Os resultados analíticos e numéricos obtidos foram comparados com observações experimentais, notando-se uma excelente concordância entre estas abordagens distintas. Foi também realizado pelos mesmos autores um estudo paramétrico para identificar a relevância dos diferentes parâmetros do modelo constitutivo de Johnson-Cook na resistência da perfuração de alvos. Os resultados indicam que o amaciamento térmico não pode ser negligenciado. Por este motivo foi proposto um procedimento alternativo para a identificação das constantes do material usado na teoria da expansão de uma cavidade (CET). Gupta e Madhu (Gupta and Madhu, 1997) estudaram o desempenho balístico simples e em multicamadas de alvos metálicos com velocidades de impacto compreendidas entre 800 e 880 m/s, tendo concluindo que quando o número de camadas do material é superior a dois, a resistência balística do material diminui.

Os autores, Nsiampa, Dyckmans e Chabotier (Nsiampa et al., 2007), realizaram simulações numéricas e estudos experimentais de forma a prever o comportamento de alvos de liga de alumínio 5083, quando sujeitos ao impacto balístico de uma munição de 7.62 mm AP (*Armour Piercing*). Estes autores concluíram que o interior de chumbo do projétil contribui muito mais para um aumento de energia de impacto do que o revestimento do projétil, de cobre ou de latão. Os autores Grytten et al. (Grytten et al., 2009b) estu-

daram os fenómenos de penetração balística. No início do século XXI, o cálculo analítico, baseado na CET, foi comparado por estes autores com resultados obtidos através simulações não-lineares de elementos finitos, tendo ambas as análises sido comparadas com resultados experimentais. Estes autores concluíram que os resultados usando a CET ou análises por elementos finitos são muito semelhantes, desde que as condições iniciais sejam idênticas. Em 2007, Grytten et al. (Grytten et al., 2007) estudaram numérica e experimentalmente a perfuração quase-estática de alvos circulares finos de liga de alumínio 5083-H116. Em 2009 os mesmos autores observaram a perfuração a baixa velocidade de alvos de liga de alumínio 5083-H116, concluindo que a deformação dinâmica influencia quer o nível do esforço envolvido quer a fratura do alvo, enquanto o amaciamento térmico influencia apenas a fratura (Grytten et al., 2009a).

No ano 2008 os autores Demir et al. (Demir et al., 2008) investigaram o comportamento de alvos de diversos materiais tais como, as ligas de alumínio 7075 e 5083 e o aço de elevada resistência AISI 4140, sob o impacto com um projétil 7,62 mm AP. Foram aplicados vários tratamentos térmicos nos alvos, para estudar o seu comportamento balístico no que diz respeito a dureza e resistência. Os resultados experimentais obtidos por estes autores revelam que, de entre todos os materiais estudados, o melhor desempenho balístico foi obtido com a liga de alumínio 7075-T651, que mantém uma proteção balística com uma densidade de área superior a 85 kg/m².

3.2 A Cortiça

A cortiça é um material celular natural produzido pelo sobreiro (*Quercus suber* L.), sendo o revestimento exterior do tronco e ramos. O sobreiro pertence à ordem das Fagales, família das Fagáceas, género *Quercus*, sendo a espécie *Quercus suber*. A cortiça é extraída do sobreiro em intervalos mínimos de nove anos, sob a forma de pranchas com espessuras que variam com o processo industrial a que se destina. A extração da cortiça é feita em cortes tangenciais e longitudinais na casca da árvore, com o auxílio de um machado, sendo este processo designado por *descortiçamento* ou *desbóia*.

O sobreiro desenvolve-se idealmente em terrenos arenosos descalcificados, com pH neutro ou ácido, com níveis de pluviosidade entre os 400 a 800 mm anuais e temperaturas médias entre 14 e 15 °C (Azul, 2002). O sobreiro é uma árvore de crescimento lento e de grande longevidade, que pode atingir 250 a 350 anos de idade embora, para a produção de cortiça, a idade limite seja de 150 a 200 anos.

A primeira cortiça produzida pelo sobreiro é designada por cortiça virgem e é extraída entre os 25 a 30 anos de idade da árvore, quando esta atinge dimensões consideradas razoáveis pela prática florestal. Esta extração ocorre frequentemente quando o diâmetro da árvore varia entre os 20 e os 25 cm. Esta cortiça apresenta sulcos e fendas verticais significativas, resultado das fraturas que ocorrem devido às fortes tensões tangenciais originadas pelo crescimento radial do tronco, sendo apenas utilizada para o fabrico de aglomerados.

A segunda camada de cortiça produzida pelo sobreiro, designada por cortiça secundária, é gerada pelo *felogénio* (camada geradora de cortiça) traumático (resposta ao trauma provocado pelo descortiçamento) formado pelo primeiro descortiçamento. Nesta segunda camada, as tensões resultantes do crescimento radial da árvore ainda são consideráveis e a cortiça ainda apresenta bastantes fraturas e fendas verticais. A terceira

camada, conhecida por *amadia*, é extraída ao fim de 40 a 50 anos de idade do sobreiro. Esta apresenta-se como uma camada uniforme, com poucas fraturas e de pequena profundidade. Com esta idade a árvore já se encontra na fase adulta e o crescimento radial é menor, sendo as tensões resultantes do engrossamento do tronco bastante reduzidas, não provocando a rotura dos tecidos. Esta é a camada que constitui a principal matéria-prima para a indústria das rolhas.

A capacidade de regeneração de *felogénio*, após a extração da cortiça, permite a exploração do sobreiro de um forma sustentada ao longo de grande parte da vida da árvore, através de sucessivas extrações de cortiça.

Existem diversas aplicações para a cortiça, desde as rolhas a artigos de artesanato, utensílios de cozinha, solas para calçado, isolantes térmicos e acústicos, revestimentos de paredes e tetos, juntas para motores de explosão, queima para produção de energia (pó de cortiça) entre outras (Gouveia, 2001). Por estes motivos, a cortiça é também utilizada como material para isolamento acústico e térmico, absorção de vibrações, como vedante, como calçado, entre outros. É também um material natural, ecológico, higiénico, de fácil manutenção e com elevada durabilidade.

3.2.1 Micro-aglomerado de cortiça

Devido à anisotropia e estrutura celular da cortiça, podem definir-se três direções principais e três secções principais. As primeiras são designadas de acordo com a orientação em relação ao tronco da árvore. Assim, as direções segundo o raio e o eixo do tronco designam-se por radial e axial, respetivamente. A direção tangente à circunferência do tronco designa-se por tangencial.

Das características mecânicas da cortiça, há que destacar a sua baixa densidade e grande elasticidade (devido à estrutura alveolar), a sua impermeabilidade (devido à suberina presente nas faces do alvéolos) o seu elevado coeficiente de atrito e as propriedades isolantes, que ao nível térmico quer acústico e vibratório.

Os micro-aglomerados de cortiça (MAC), que permitem obter propriedades muito mais homogêneas e comportamento isotrópico e podem ser fabricados industrialmente com dimensões e geometrias mas diversificadas do que a cortiça natural, foram inventados pelo norte-americano John Smith em 1891 (Soares, 2007). Existem dois grupos de MAC que se distinguem pela presença de materiais adicionais, tais como resinas aglomerantes, borracha ou óleo de linhaça. Aos micro-aglomerados constituídos apenas por grãos de cortiça, dá-se o nome de aglomerados puros. Os aglomerados a que se adicionam materiais (adesivos, *etc.*) pertencem ao grupo dos aglomerados compostos. Neste trabalho foram utilizados dois micro-aglomerados de cortiça compostos designados por NL20 e por TB40 (Amorim, 2012). Na figura 3.3 está representada uma amostra de folhas de micro-aglomerado de cortiça.

Os granulados são obtidos através da ação de vários tipos de moinhos em função do material a triturar e do tipo de grânulos pretendidos. Normalmente é também efetuada uma secagem por circulação forçada de ar quente para obter o grau de humidade desejada no granulado. Depois de obtidos os granulados, passa-se à produção dos compostos de cortiça que resultam de um processo de aglutinação dos grânulos com uma granulometria e massa volúmica específicas e pré-determinadas por ação de um agente de aglutinação, em função do produto e aplicação pretendida. Com a ajuda do doseamento automático ou manual, são misturados os grânulos, com os aglutinantes e eventualmente outros agentes



Figura 3.3: Exemplos de folhas de micro-aglomerado de cortiça (Paranacouros, 2012).

auxiliares num processo mecânico realizado com pás ou hélices. De seguida, a mistura é colocada em moldes metálicos e depois são colocadas tampas e efetuada a prensagem, feita sob determinada pressão. Os moldes que contém a mistura são colocados em fornos de aquecimento ou sistemas de alta-frequência contínuos ou descontínuos. Depois do processo anterior concluído efetua-se a desmoldagem e um arrefecimento/estabilização, obtendo-se um bloco aglomerado que é laminado em folha, por vezes a quente. A fase seguinte é a lixagem, para acerto da espessura e para obter o grau de rugosidade pretendida. De seguida as folhas são cortadas e depois são feitos acertos dimensionais (Gil, 2007).

3.2.2 Estruturas *Sandwich*

A utilização de estruturas laminadas é prática comum na construção de veículos nas indústrias aeronáuticas e aeroespacial, bem como nas industria civil e indústria mecânica (Librescu and Hause, 2000). Um dos exemplos típicos de aplicação destas estruturas é a construção de placas tipo *sandwich*. Este facto deve-se à sua propriedade de combinar alta rigidez à flexão e um baixo peso, resultando numa estrutura muito eficiente quer em termos estruturais quer de absorção de energia. As placas *sandwich* são concebidas e adaptadas como meio de gerar estruturas resistentes, para uma longa duração e um baixo peso. Estas estruturas são especialmente eficientes na transferência de cargas de flexão e compressão. Na figura 3.4 está representado um exemplo de uma placa *sandwich* com núcleo de micro-aglomerado de cortiça.

A principal característica das estruturas *sandwich* é a sua construção, pois a sua estrutura é composta por uma ou mais camadas finas exteriores de material de elevada resistência, denominada face, e uma ou mais camadas internas, espessas e de baixa densidade, denominadas por núcleo. Quase todos os materiais compósitos podem ser utilizados como material das faces (e.g. os de reforço de fibra de carbono) e também materiais com baixa densidade (predominantemente o alumínio). Normalmente como material para o núcleo são utilizados polímeros de baixa densidade (PVC ou poliuretano) ou estruturas compostas e/ou celulares principalmente de alumínio (Librescu and Hause, 2000).

No modo de funcionamento, as estruturas *sandwich* podem ser comparadas às vigas em I, sendo os banzos e a alma das vigas as faces e o núcleo das estruturas *sandwich*,



Figura 3.4: Exemplo de placa *sandwich* com núcleo de micro-aglomerado de cortiça (Amorim, 2012).

respetivamente. As faces da estrutura suportam os esforços à flexão da estrutura, estando uma face à compressão e outra à tração, enquanto que o núcleo suporta os esforços de corte gerados por esforços transversos e torção, de modo a impedir que ambas as faces deslizem. A parte interior, ou seja, o núcleo, suporta (evita) também o esmagamento e engelhamento (instabilidade estrutural) devido à concentração de cargas. Na tabela 3.5 estão representadas os modos de falhas das placas *sandwich*.

No presente trabalho foram utilizadas estruturas tipo *sandwich*, constituídas por dois materiais diferentes com adesão perfeita. A sua combinação faz com que o elemento, como um todo, ganhe em termos de eficiência estrutural. O material utilizado para as chapas de face (com 1 mm de espessura) foi a liga de alumínio 5754-H22 e, para o núcleo, foram usados dois micro-aglomerados de cortiça com diferentes densidades, o NL20 e o TB40, fabricados e fornecidos pela empresa Amorim Cork Composites, do grupo Amorim.

Estado de Arte

Aparentemente, a primeira referência escrita à cortiça é de Plínio, o Velho (d.C. 77), que descreve nos seguintes termos: "*O sobreiro é uma planta pequena; o único produto útil que origina é a casca, muito espessa, e que, uma vez removida, volta a crescer*". Passados aproximadamente vinte anos, Plutarco refere o emprego da cortiça pelos romanos em barcos, desde o ano 400 a.C.

O comportamento da cortiça tem sido estudado por vários autores. A estrutura da cortiça e a deformação das suas paredes celulares em ensaios de tração e de compressão foram estudadas em grande detalhe por Gibson et al. (Gibson et al., 1981). Neste trabalho foram relacionados valores do módulo de elasticidade e propriedades mecânicas da cortiça, segundo as suas direções principais (radial, axial e tangencial), obtidas experimentalmente com expressões teóricas baseadas na deformação da estrutura celular do material. Em Janeiro de 1988, Rosa e Fortes (Rosa and Fortes, 1988) investigaram o efeito da velocidade de deformação no comportamento da cortiça em compressão tendo já em consideração a anisotropia do material. Os mesmos autores estudaram também a recuperação de dimensões após compressão, inferindo que a taxa de recuperação diminui significativamente com o tempo e aumenta com o grau de deformação inicial. Noutra publicação do mesmo ano, os autores apresentaram um estudo sobre relaxação de tensões e fluência da cortiça sob compressão, também nas três direções principais. Em 1997 foi

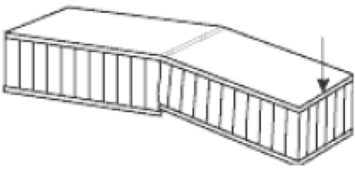
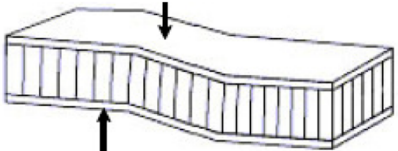
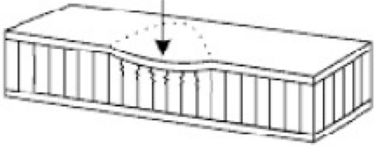

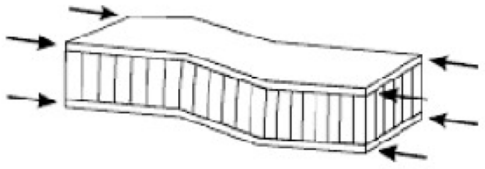


<p>Falha das Faces</p> 	<p>Espessura insuficiente das faces e/ou resistência das faces insuficiente podem causar falha das faces, que pode ocorrer tanto na face à tracção como na face à compressão.</p>
<p>Falha por esforço transversal</p> 	<p>Ocorre quando a resistência do núcleo ao corte ou a espessura do painel são insuficientes.</p>
<p>Esmagamento local do núcleo</p> 	<p>Ocorre quando a resistência à compressão do material do núcleo é demasiado baixa.</p>
<p>Engelamento local</p> 	<p>Ocorre quando a espessura do painel ou a resistência do núcleo ao corte são demasiado baixas.</p>
<p>Engelamento Geral</p> 	<p>Engelamento geral, que pode ser consequência do engelamento local, ocorre quando o módulo de corte do núcleo ou a resistência ao corte do adesivo é demasiado baixa.</p>
<p>Engelamento das faces</p> 	<p>Falha à compressão do núcleo (engelamento para dentro), ou falha nos adesivos (engelamento para fora), pode ocorrer, dependendo da resistência relativa do núcleo à compressão em comparação com a resistência dos adesivos em tensão no plano.</p>
<p>Instabilidade local</p> 	<p>Engelamento intracelular (passível de ocorrer apenas em materiais celulares) ocorre quando as faces são muito finas em relação ao tamanho de célula. Este efeito provoca falha se se propagar para células adjacentes.</p>

Figura 3.5: Modos de falha de placas *sandwich* (Broughton et al., 2002).

publicado no livro *Cellular Solids*, de Gibson e Ashby (Gibson and Ashby, 1999), a teoria da deformação das paredes de materiais celulares, em particular da cortiça, sob diversas

solicitações.

Em 2002, Mano (Mano, 2002) estudou as propriedades viscoelásticas da cortiça para uma gama de temperaturas entre -40 e 120°C . O resultado deste estudo foi a determinação dos módulos de armazenamento e de perda. No seguimento deste estudo, em 2007 o mesmo autor realizou ensaios de fluência em provetes de cortiça sob compressão, a temperaturas entre 0 e 50°C , e avaliou o comportamento em termos de relaxação de tensões (Mano, 2007). Vaz e Fortes (Vaz and Fortes, 1998), em 1998, realizaram estudos sobre o atrito da cortiça em contacto com outros materiais e com a própria cortiça, bem como a relação do coeficiente de atrito do material com a tensão de compressão, velocidade de deslizamento e humidade da amostra, tendo obtido valores para o coeficiente de atrito entre $0,4$ e $1,2$. Marat-Mendes e Neagu (Marat-Mendes and Neagu, 2003) investigaram a relação entre as propriedades elétricas da cortiça com o teor de humidade do material e analisaram o processo de relaxação dielétrica. Costa et al. (Costa et al., 2003) analisaram a viabilidade do crescimento radial em sobreiros adultos na zona do sudoeste de Portugal, obtendo resultados úteis para a otimização do tempo de ciclo de produção de cortiça, de modo a efetuar a extração das pranchas das cortiças no momento em que se espera obter o produto com determinadas características, principalmente uma determinada espessura. Em 2008, Costa et al. (Costa et al., 2008), estudaram a relação entre o crescimento do sobreiro e as características do solo, do declive e de escoamento de montados na zona sudeste de Portugal.

Os mecanismos de deformação das células da cortiça para a caracterização do comportamento mecânico do material quando sujeito a solicitações variadas foram estudados por Pereira et al. (Pereira et al., 1987) e por Pina e Fortes (Pina and Fortes, 1996). A influência dos mecanismos de crescimento das células de cortiça no sobreiro sobre as propriedades mecânicas desta foi estudada por Pereira et al. (Pereira et al., 1992) e por Fortes e Rosa (Fortes and Rosa, 1992). Estes autores observaram tensões tangenciais de tração crescentes e tensões radiais de compressão decrescentes com o aumento da distância ao eixo do sobreiro. Analisaram também algumas consequências das tensões de crescimento como as ondulações das paredes celulares, a variação de espessura dos anéis de crescimento e a existência de fendas nas camadas exteriores da cortiça.

Fortes e Rosa (Rosa and Fortes, 1991), em 1987, estudaram a influência do gás presente no interior das células da cortiça sobre as propriedades mecânicas. Estes autores afirmaram que a contribuição do gás se podia desprezar para níveis de deformação inferiores a 70% . Em 1991, os mesmos autores averiguaram os mecanismos de fratura da cortiça e estudaram as propriedades relacionadas com a deformação e fratura do material, quando solicitado à tração (Rosa and Fortes, 1991). Estes autores estudaram ainda os parâmetros que regem a absorção de água pela cortiça e os seus efeitos no comportamento mecânico do material, tendo em conta a anisotropia da cortiça (Rosa and Fortes, 1993). Os autores Fortes e Nogueira realizaram uma análise bastante detalhada dos mecanismos de deformação da cortiça e estudaram o efeito de Poisson (Fortes and Teresa Nogueira, 1989). Os aglomerados puros de cortiça observados através de microscopia eletrónica, antes e após densificação do material (para diferentes tipos de densificação) foram estudados por Gil. Este autor analisou também a relação entre a distância média das paredes celulares e a compressão aplicada, bem como a influência dos tratamentos de densificação na composição química do aglomerado (Gil, 1994; Gil, 1996). Teixeira et al. (João Teixeira et al., 1996) estudaram a influência da molhabilidade de alguns adesivos utilizados no fabrico de cortiça micro-aglomerada sobre o comporta-

mento mecânico de aglomerados compostos de cortiça. O comportamento mecânico à compressão, à flexão em três pontos e a estrutura microscópica dos aglomerados foram também estudados pelo mesmo autor. Gómez-Serrano et al. (Gómez-Serrano, 2003) realizaram um estudo sobre a densidade de aglomerados puros e compostos fabricados a partir de desperdícios de cortiça. Analisaram ainda o efeito do tamanho das partículas de cortiça e do teor de resina na densidade aparente dos aglomerados. Os estudos sobre atrito, amortecimento de vibrações e isolamento acústico têm sido em grande parte motivados pelo mercado dos painéis de aglomerado para a construção civil (Gameiro, 2007).

Em 2004 foi publicado o primeiro livro científico sobre a cortiça escrito por Fortes et al., intitulado *A cortiça* (Forte et al., 2004). Este livro divulga os conhecimentos científicos nesta área obtidos até à data da sua publicação, de uma forma extensa e completa. No ano 2007 a autora Helena Pereira escreveu um livro no mesmo âmbito, *Cork: Biology, Production and Uses* (Pereira, 2007). Ambos os livros incluem informação sobre a formação e crescimento da cortiça; a sua estrutura e composição química; a qualidade da cortiça; propriedades físicas tais como a densidade, a resistência ao desgaste e as propriedades térmicas, elétricas, viscoelásticas e acústicas; as propriedades e o comportamento mecânico à compressão, tração, fratura e torção; os produtos quer de cortiça natural, quer de cortiça aglomerada; entre outras.

Gameiro et al. (Gameiro et al., 2007a) estudaram a cortiça quando sujeita a solicitações de impacto e a utilização deste material em sistemas de absorção de energia. Estes autores realizaram estudos experimentais e numéricos sobre o comportamento dinâmico de diferentes tipos de cortiça quando solicitada em compressão, a diferentes taxas de deformação. Adicionalmente, de forma a estudar a utilização da cortiça como material de absorção de energia de impacto em componentes estruturais, os autores testaram, para diferentes velocidades de deformação, o comportamento de tubos de alumínio de secção circular e quadrangular com e sem cortiça confinada. Os resultados obtidos numericamente com o programa LS-DynaTM, através do método dos elementos finitos, mostraram estar em razoável conformidade com os resultados obtidos experimentalmente. Finalmente, os resultados obtidos com cortiça confinada, em termos de capacidade de absorção de energia, mostraram-se bastante satisfatórios e mostraram que a utilização deste material neste âmbito apresenta grande potencialidade.

Em 2009, Gil (Gil, 2009) fez um levantamento histórico e uma breve descrição sobre os compósitos de cortiça e concluiu que devido às suas características específicas podem surgir novas aplicações, tornando-se assim este material bastante promissor na tecnologia da cortiça. Castro et al. (Castro et al., 2010) estudaram a resistência mecânica dos diferentes tipo de cortiça micro-aglomerada bem como a capacidade de resistência a cargas dinâmicas. Estes autores concluíram que o desempenho dos aglomerados de cortiça dependem essencialmente do tamanho dos grânulos de cortiça, da sua densidade e do processo de ligação utilizado para a coesão de granulados.

Mais recentemente, Sousa-Martins e Teixeira-Dias estudaram um micro-aglomerado de cortiça entre dois painéis de liga de alumínio, a fim de combinar as propriedades leves dos materiais com a sua elevada capacidade de absorção de energia, concluindo que a inclusão do núcleo de cortiça micro-aglomerada aumenta a capacidade de absorção de energia quando ocorre uma explosão (Sousa-Martins and Teixeira-Dias, 2011). Sousa-Martins et al. (Sousa-Martins et al., 2012) mediram numérica e experimentalmente o impulso transmitido a um alvo, de cortiça micro-aglomerada, submetido a uma onda de choque originada a partir da detonação de um explosivo. Estes autores encontraram

uma boa correlação com a análise experimental conduzindo assim ao desenvolvimento de um modelo de material adequado para o comportamento dinâmico destes compostos de cortiça.

Parte II

Testes Reais

Capítulo 4

Análise Experimental

4.1 Introdução

Neste capítulo são descritos os procedimentos dos ensaios experimentais, realizados no *Department of Weapon Systems and Ballistics*, da *Royal Military Academy*, na Bélgica. Como na generalidade dos projetos científicos, a componente teórica deve ser, sempre que possível, acompanhada de testes experimentais que validem os modelos teóricos. Assim, no âmbito desta dissertação foram realizados dois conjuntos de ensaios onde a diferença reside na configuração do alvo utilizado e na geometria do projétil. No primeiro grupo de ensaios utilizou-se um alvo com uma estrutura *sandwich* e uma placa de aço balístico. Neste caso, o projétil utilizado foi um *fragment simulating projectile* (FSP). O segundo grupo de ensaios tem apenas como alvo a placa *sandwich* e o projétil utilizado foi um projétil esférico. A generalidade dos testes foram realizados para obtenção de resultados qualitativos para observar se os projéteis atravessavam a placa e quantos atravessavam.

O micro-aglomerado de cortiça designado por NL20 é menos denso do que o TB40, por este motivo foi utilizado apenas o primeiro aglomerado nos testes de validação do modelo numérico uma vez que realizando o teste para o aglomerado menos denso maior será a deformação. À partida, os resultados para o TB40 serão melhores do que para o NL20. Estes micro-aglomerados de cortiça descritos anteriormente são apresentados no Capítulo 6 desta dissertação.

Devido à vasta variedade de ensaios experimentais realizados durante este trabalho foi necessário recorrer a referências para designar os ensaios, em concordância com a espessura do micro-aglomerado, com a densidade do mesmo e com o tipo de projétil. Deste modo, cada ensaio realizado será designado por uma sigla alfa-numérica, da seguinte forma genérica:

$$XYZZ,$$

em que X representa o tipo de projétil utilizado, FSP, designado pela letra F, ou esférico, designado pela letra E; Y designa o tipo de aglomerado utilizado, o NL20, aqui representado pela letra N, ou o TB40, representado pela letra T; e por fim o ZZ é a espessura do micro-aglomerado de cortiça (em milímetros). A título de exemplo a sigla ET10 designa um ensaio realizado com um projétil esférico, com o micro-aglomerado TB40 e com espessura do composto (núcleo) de 10 mm. Na tabela 4.1 estão apresentadas as referências de todos os ensaios realizados.

Tabela 4.1: Referências utilizadas nos ensaios com a respetiva designação completa.

Designação Completa	Referência
ET10	Projétil esférico, TB40, 10 mm de espessura
ET30	Projétil esférico, TB40, 30 mm de espessura
EN10	Projétil esférico, NL20, 10 mm de espessura
EN30	Projétil esférico, NL20, 30 mm de espessura
FN15	Projétil FSP, NL20, 15 mm de espessura
FN30	Projétil FSP, NL20, 30 mm de espessura

4.2 Alvo: Placa *Sandwich* e Aço Balístico

De modo a verificar quer a eficácia quer a viabilidade da utilização do aglomerado de cortiça como material para a absorção de impacto (balístico), é necessário averiguar se este material apresenta vantagens significativas. Para a realização dos testes referidos na tabela 4.1 foi utilizado um micro-aglomerado de cortiça, designado por NL20, fornecido pela empresa Amorim Cork Composites, do grupo Amorim. O primeiro modelo de material serviu para validar o modelo de simulação numérica e o projétil utilizado foi um projétil FSP, sendo este projétil apenas utilizado em testes experimentais e de laboratório.

Na figura 4.1 pode observar-se um esquema representativo da montagem experimental dos ensaios balísticos da placa *sandwich* e aço balístico com o projétil FSP. Foi utilizada uma arma de ar comprimido, apresentada na figura 4.2a, para efetuar o disparo do projétil e no alvo encontra-se a placa *sandwich* com o micro-aglomerado de cortiça NL20 e a placa de aço balístico, ambas fixas por uma garra de fixação na parte inferior das placas e por um grampo na parte superior esquerda das placas, como se pode ver pela figura 4.2c. A placa *sandwich* e a placa de aço balístico encontram-se apenas encostadas uma à outra.

Para o registo dos dados foram utilizados dois radares de Doppler, ilustrado na figura 4.2b. O cálculo da velocidade de impacto foi estimada através da velocidade do projétil (a 10 e 15 metros de distância dos radares de Doppler) e da desaceleração do projétil no intervalo de velocidades consideradas. Na equação 4.1 é apresentada a equação aritmética utilizada para a obtenção da velocidade de impacto do projétil. Para estes ensaios experimentais foram realizados testes em duas placas de micro-aglomerado com duas espessuras diferentes, 15 e 30 mm.

A velocidade de impacto é assim calculada com a seguinte expressão:

$$V_i = \frac{(V_{10} - 5R) + V_{15}}{2}, \quad (4.1)$$

em que V_i é a velocidade de impacto do projétil, V_{10} a velocidade do projétil a 10 metros do radar de Doppler, R corresponde à desaceleração do projétil no intervalo de velocidades consideradas e, por fim, V_{15} corresponde à velocidade obtida a 15 metros do radar de Doppler.

4.3 Alvo: Placa *Sandwich*

No segundo conjunto de testes experimentais foi utilizado um projétil esférico, e foi retirada do alvo a placa de aço balístico, ficando apenas como alvo a placa *sandwich*.

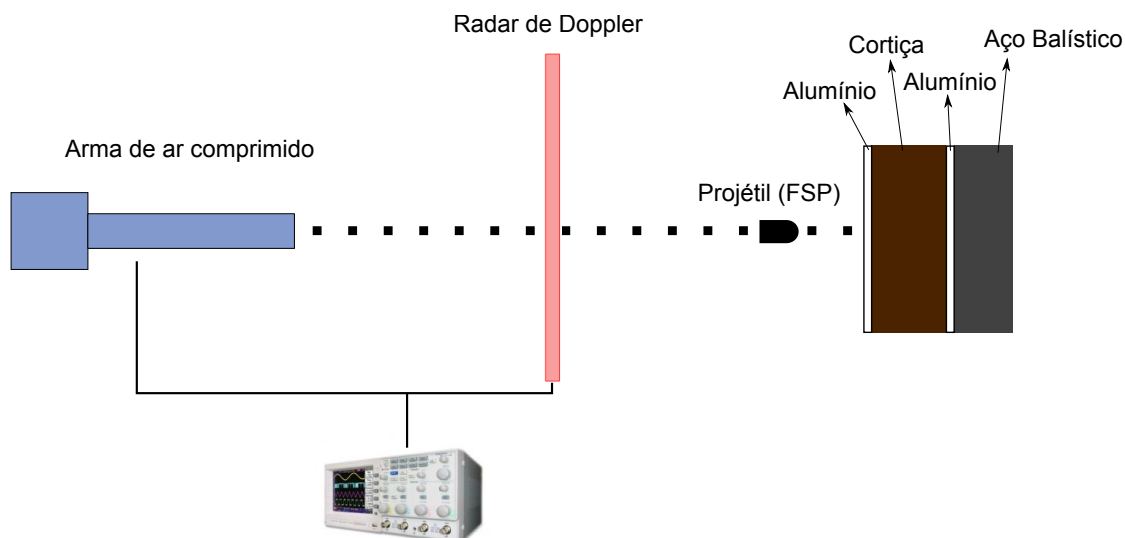
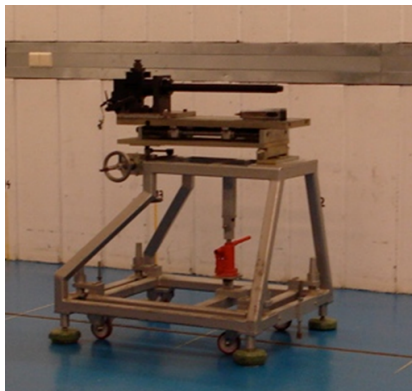


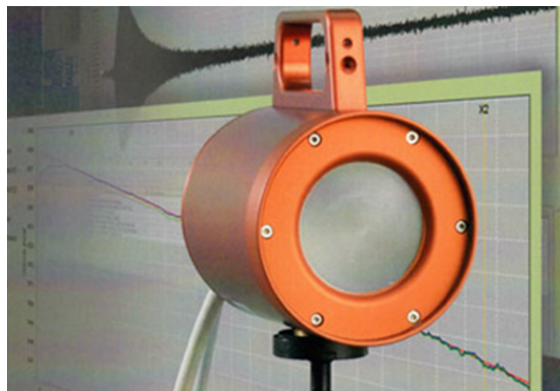
Figura 4.1: Representação esquemática da configuração experimental utilizada para realização dos ensaios balísticos com o projétil FSP.

Para os testes acima referidos foram utilizadas duas espessuras diferentes de aglomerados de cortiça, uma de 10 mm e outra de 30 mm. Nestes ensaios foram realizados testes com dois micro-aglomerados de densidades diferentes, um designado por NL20, com uma densidade de 200 kg/m^3 e outro designado por TB40, com uma densidade de 440 kg/m^3 . Na figura 4.3 está representado um esquema da montagem experimental utilizada nos testes reais com o projétil esférico e com a placa *sandwich*.

Foi utilizada uma arma de ar comprimido para efetuar o disparo do projétil esférico construído em aço e com um diâmetro de 4,37 mm. Para o controlo da velocidade de impacto do projétil foram utilizados dois radares de Doppler e para determinar a velocidade residual do projétil à saída da placa *sandwich* foi utilizada uma câmara de alta velocidade.



(a) Arma de ar comprimido.



(b) Radar de *Doppler*



(c) Alvos (placa *sandwich* e aço balístico.)

Figura 4.2: Fotografias dos diversos componentes da montagem experimental para validação do modelo.

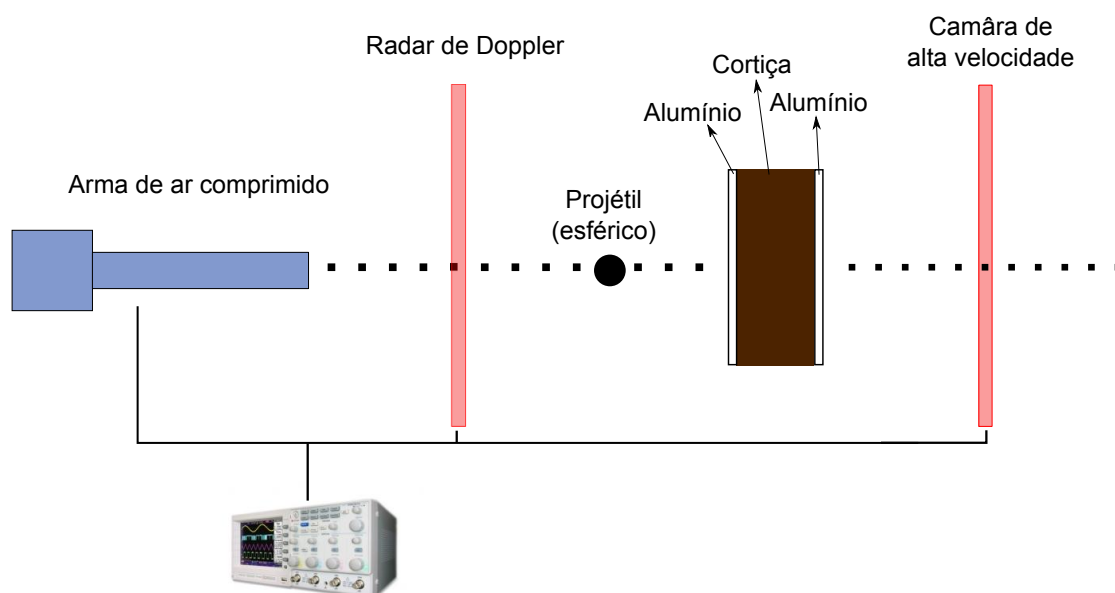


Figura 4.3: Representação esquemática da montagem experimental utilizada para realização dos ensaios balísticos com o projétil esférico.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de interesse no âmbito deste trabalho. São apresentados os resultados da velocidade de impacto do projétil e da velocidade V_{50} obtida pelo método de STANAG 2920 e também pelo método de Lambert, que serão aqui explicados. Neste capítulo também se analisam os modos de impacto nas placas *sandwich* para todos os testes realizados.

5.1 Determinação do limite balístico

Para o primeiro conjunto de simulações foram utilizados dois métodos para a obtenção do limite balístico. Define-se o limite balístico V_{50} de um determinado alvo (material, estrutura e configuração) como a velocidade para a qual a probabilidade de penetração total de um projétil é de 50% (STANAG, 2003).

O método STANAG 2920 foi um dos utilizados no presente trabalho para calcular o valor de V_{50} . Depois de realizado um número de ensaios considerável foi tomado como valor do limite balístico, a média aritmética das velocidades registadas pelo impactos válidos. Posteriormente, são escolhidas as três velocidades mais elevadas em que se registou penetração parcial do projétil na placa e as três velocidades mais baixas em que se registou penetração completa, desde que as seis velocidades fiquem compreendidas num intervalo de 40 m/s. Se não for possível atingir o resultado acima referido, adiciona-se a velocidade de perfuração parcial mais elevada e a velocidade de penetração completa mais baixa acima de 40 m/s, então os ensaios continuarão até que cinco velocidades parciais mais elevadas e as cinco velocidades completas mais baixas fiquem dentro de um intervalo de 50 m/s. O limite balístico pelo método de STANAG 2920, é então calculado como a média destas dez velocidades. Se mais uma vez não for possível atingir o resultado anteriormente referido, os ensaios continuarão até que as sete velocidades parciais mais elevadas e as sete velocidades completas mais baixas fiquem dentro de um intervalo de 60 m/s. O limite balístico será então calculado como a média destas catorze velocidades (STANAG, 2003). Se a velocidade de perfuração parcial mais elevada exceder a velocidade de penetração completa mais baixa em mais de 60 m/s, então o teste deverá ser repetido numa nova amostra de material.

Para o estudo da velocidade residual, foi utilizado o método Lambert. Neste método, ao contrário do anterior, são importantes os valores da velocidade de impacto mas também a velocidade residual à saída das placas *sandwich*. Esta técnica tenta encontrar

uma relação entre a velocidade de impacto e a velocidade residual. Quando encontrada a função que estime a velocidade residual através da velocidade de impacto, o zero da função corresponde ao limite balístico, V_{50} . A equação desta função é derivada da lei da conservação da energia. Neste trabalho foram utilizadas três variantes do método de Lambert: o método direto, direto V_{50} STANAG e indireto. Para que seja eficaz este método requer pelo menos três disparos em que a velocidade de impacto seja superior ao limite balístico (Andrew Ferriter et al., 1999). A velocidade residual é assim calculada com a expressão

$$V_r = a(V_i^p - V_{50}^p)^{1/p}, \quad (5.1)$$

em que a e p são parâmetros desconhecidos, V_i corresponde à velocidade de impacto e V_{50} é o limite balístico. São necessários três disparos de forma a encontrar três equações distintas para determinar os parâmetros da equação desconhecidos com exceção do termo do erro. Depois de definida a curva, o limite balístico corresponde ao zero da função.

Conforme referido, uma aplicação eficiente do método aqui apresentado necessita de três disparos com penetração completa. Estes disparos fornecem a informação necessária para encontrar todos os parâmetros desconhecidos, com a exceção do erro. Depois de calculado o limite balístico é utilizada esta velocidade para a velocidade do próximo disparo. Se nesse disparo ocorrer penetração completa as variáveis da equação têm que ser recalculadas e o próximo disparo será com esta nova velocidade. Caso não ocorra a penetração completa, aumenta-se a velocidade do disparo até que esta ocorra. Assim que ocorrer a penetração completa na placa serão calculados os novos parâmetros da equação. Este método permite uma aproximação bastante realista do valor real da velocidade de limite balístico V_{50} .

5.2 Resultados Experimentais

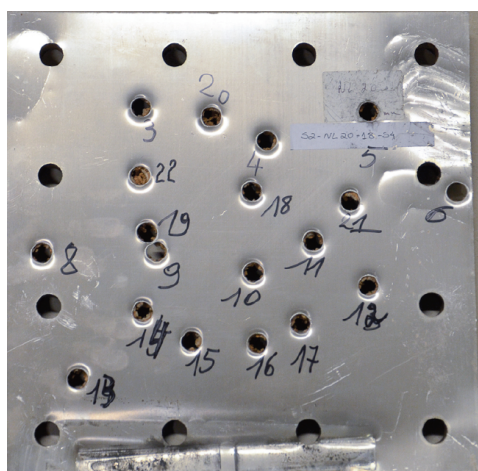
Nesta secção são apresentados os resultados obtidos em termos de velocidades de impacto e velocidade residual, bem como imagens das placas *sandwich* com os disparos efetuados. São também apresentados os gráficos no caso em que o alvo é apenas a placa *sandwich*, com os disparos e as curvas obtidas pelas três variantes do método de Lambert. No primeiro conjunto de simulações são apresentadas as velocidades de limite balístico V_{50} .

5.2.1 Alvo: placa *sandwich* e aço balístico

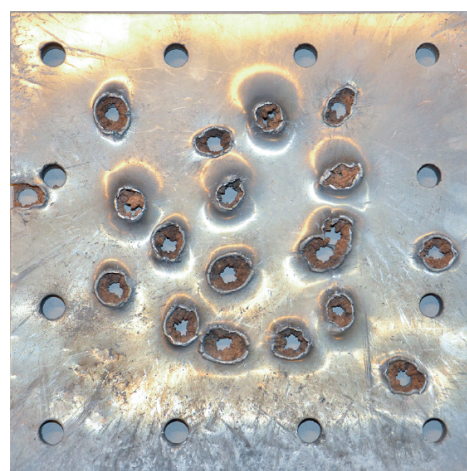
Na figura 5.1 mostram-se duas imagens da placa *sandwich* FN15, sendo a figura da esquerda a vista anterior e a figura da direita a vista posterior da placa *sandwich*. Como se pode observar, estão representados e enumerados todos os disparos realizados. Também é possível visualizar os locais deformados do alvo, em baixo correspondendo à garra de fixação e em cima à esquerda ao grampo utilizado.

Na figura 5.2 é apresentada a placa *sandwich* FN30, onde é possível observar todos os disparos que foram efetuados.

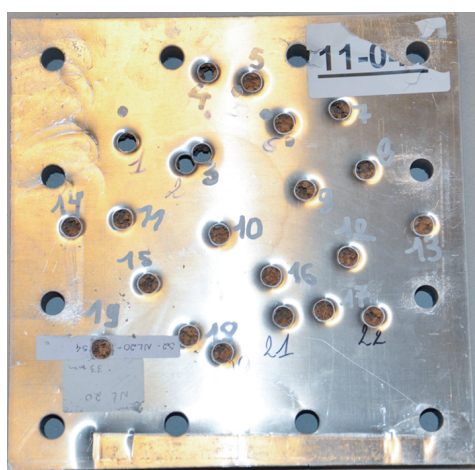
Todas as velocidades de impacto do micro-aglomerado de cortiça FN15 e FN30 estão apresentadas na tabela 5.1 com a respetiva massa e com o resultado do disparo. Nesta tabela a sigla PP designa perfuração parcial, onde o alvo não foi completamente perfurado, e a sigla CP designa completamente perfurado.



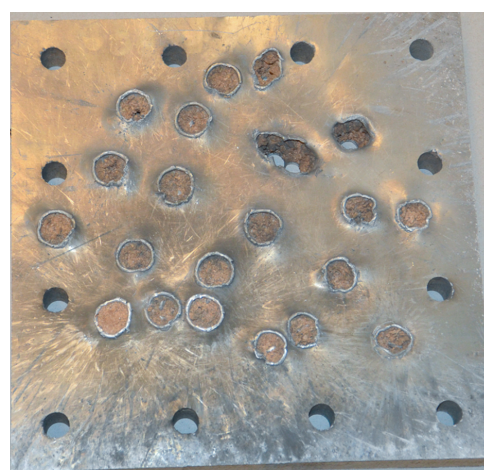
(a) Vista anterior da placa FN15.



(b) Vista posterior da placa FN15.

Figura 5.1: Fotografias da placa *sandwich* FN15: (a) vista anterior; (b) vista posterior.

(a) Vista anterior da placa FN30.



(b) Vista posterior da placa FN30.

Figura 5.2: Fotografias da placa *sandwich* FN30: (a) vista anterior; (b) vista posterior.

Tabela 5.1: Ensaios realizados para a placa *sandwich* e aço balístico com projétil FSP (massa, velocidade inicial do projétil e perfuração do alvo).

Massa M FN15 [g]	V_i FN15 [m/s]	Perfuração FN15	Massa M FN30 [g]	V_i FN30 [m/s]	Perfuração FN30
13,449	726,4	PP	13,480	780,1	PP
13,463	776,2	PP	13,364	798,5	PP
13,482	810,2	PP	13,401	812,7	PP
13,437	816,9	PP	13,465	825,1	PP
13,362	823,2	PP	13,376	828,0	PP
13,396	824,3	PP	13,451	832,3	CP
13,476	827,2	PP	13,516	837,3	PP
13,381	834,3	PP	13,378	837,4	PP
13,429	837,3	CP	13,412	839,9	PP
13,445	840,4	CP	13,378	840,9	PP
13,476	840,5	PP	13,456	842,8	PP
13,479	844,1	CP	13,468	843,5	CP
13,449	845,8	CP	13,452	847,1	CP
13,474	846,1	PP	13,459	847,8	CP
13,397	847,5	CP	13,474	848,5	PP
13,490	847,8	CP	13,467	854,8	CP
13,391	863,0	CP	13,460	855,8	CP

Pelo método de STANAG 2920 obteve-se um valor de limite balístico para a placa FN15, a de menor espessura, de $V_{50} = 837,3$ m/s. Para a placa FN30, o valor obtido para a velocidade limite balístico foi $V_{50} = 841,1$ m/s.

5.2.2 Alvo: Placa *sandwich*

Nesta secção são apresentados os resultados experimentais de impactos balísticos sobre placas *sandwich*, utilizando um projétil esférico de diâmetro 4,37 mm, com uma massa $m = 0,3399$ g.

No gráfico da figura 5.3 está representada a velocidade limite balístico em função da espessura total das placas *sandwich* para os dois micro-aglomerados de cortiça. Conforme referido anteriormente, foram realizados testes sobre duas espessuras diferentes e dois aglomerados com diferentes densidades. Pela análise destes resultados pode-se concluir que a velocidade limite balístico é sempre superior para o micro-aglomerado de cortiça com maior densidade, independentemente da espessura da placa *sandwich*, como seria de esperar.

Na figura 5.4 estão representadas fotografias dos resultados balísticos da placa EN10 com o projétil esférico. Na figura 5.4a pode ver-se a face anterior da placa, enquanto que na figura 5.4b é representada a vista posterior da placa.

Todas as velocidades de impacto do projétil na placa estão representadas na tabela 5.2 com o respetivo resultado da penetração do projétil. Na última coluna desta tabela estão listadas as velocidades residuais para a placa referida.

Depois de aplicado o método de Lambert para as três variantes do método, obtiveram-

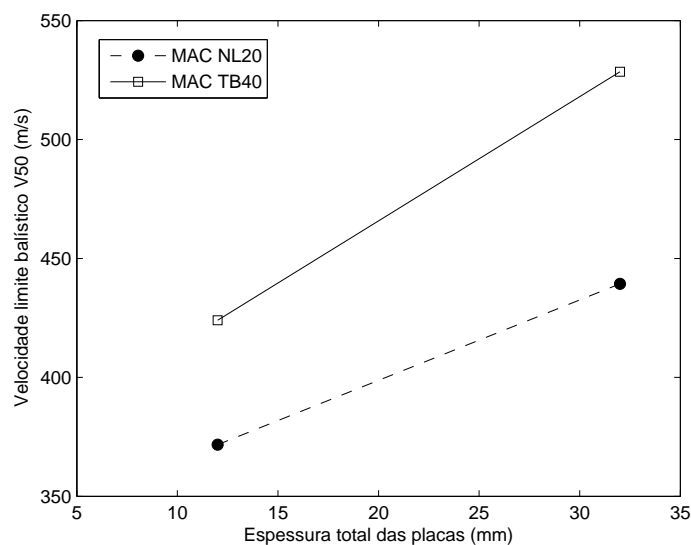


Figura 5.3: Limite balístico em função da espessura da placa *sandwich*.



(a) Vista anterior da placa EN10.



(b) Vista posterior placa EN10.

Figura 5.4: Fotografias da placa *sandwich* EN10: (a) vista anterior; (b) vista posterior.

se os resultados que se mostram na figura 5.5, que contempla todos os disparos bem como as curvas obtidas.

Para a placa EN30 (espessura do núcleo de 30 mm) foram realizados os testes que se apresentam na figura 5.6.

Na tabela 5.3 são apresentados os valores da velocidade de impacto para posterior análise da velocidade limite balístico V_{50} com o resultado da perfuração e também a velocidade residual para a placa *sandwich* EN30.

Com os resultados experimentais agora apresentados foi construído o gráfico da figura 5.7 onde são apresentados os disparos realizados bem como as curvas obtidas pelo método de Lambert.

Nos parágrafos seguintes apresentam-se os resultados experimentais relativos às placas

Tabela 5.2: Velocidade de impacto, velocidade residual do projétil e perfuração para o alvo EN10.

V_i [m/s]	Perfuração	V_r [m/s]
455	CP	232
388	CP	122
164	PP	—
290	PP	—
322	PP	—
325	PP	—
347	PP	—
328	PP	—
322	PP	—
366	PP	—
360	PP	—
378	CP	50
391	CP	108
395	CP	91

Tabela 5.3: Velocidade de impacto, velocidade residual do projétil e perfuração do alvo para a placa EN30.

V_i [m/s]	Perfuração	V_r [m/s]
451	CP	134
464	CP	175
388	PP	—
486	CP	—
436	CP	72
458	CP	118
407	PP	—
376	PP	—
455	CP	156
505	CP	222
376	PP	—
391	PP	—
350	PP	—
442	CP	68
404	PP	—
448	PP	—
436	PP	—
290	PP	—
382	PP	—
366	PP	—
470	CP	167
423	PP	—

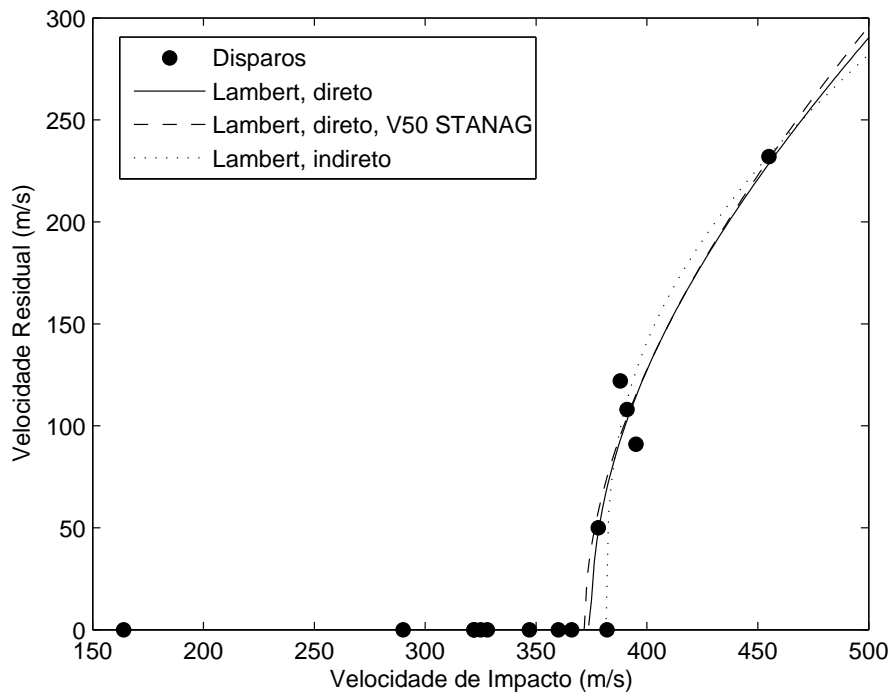


Figura 5.5: Velocidade residual em função da velocidade de impacto EN10.

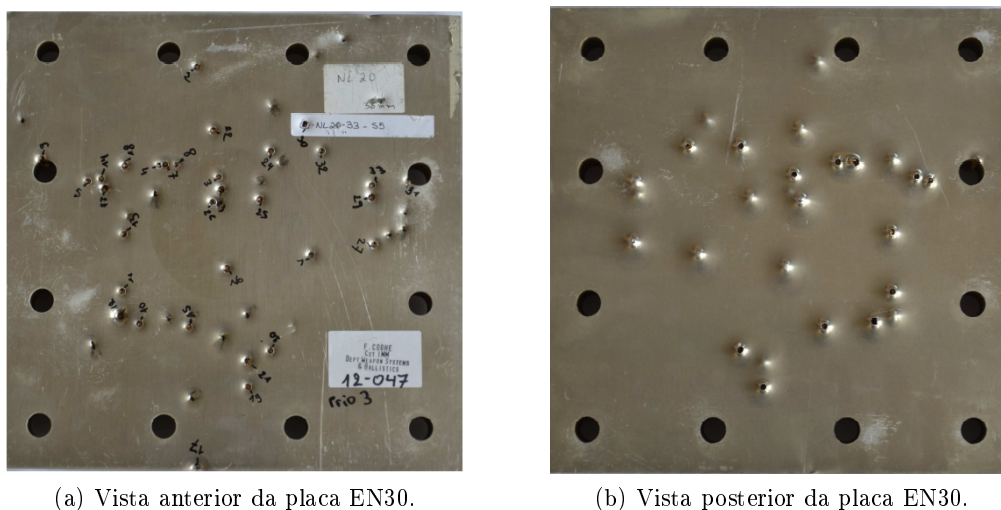
com o micro-aglomerado TB40, que apresenta uma densidade mais elevada. Na figura 5.8 são apresentadas fotografias da placa ET10.

As velocidades de impacto e residual do projétil esférico estão representadas na tabela 5.4 com a respetiva informação sobre a penetração completa ou parcial na placa *sandwich* ET10.

Tabela 5.4: Velocidade de impacto e residual do projétil e perfuração do alvo para a placa ET10.

V_i [m/s]	Perfuração	V_r [m/s]
464	CP	188
335	PP	—
417	PP	—
442	CP	145
436	CP	148
414	PP	—
423	CP	97
439	CP	134
415	PP	—

Depois de analisadas as velocidades limite balístico V_{50} obtidas com as três variantes do método de Lambert foi produzido um gráfico onde está acoplada toda a informação (ver figura 5.9).



(a) Vista anterior da placa EN30.

(b) Vista posterior da placa EN30.

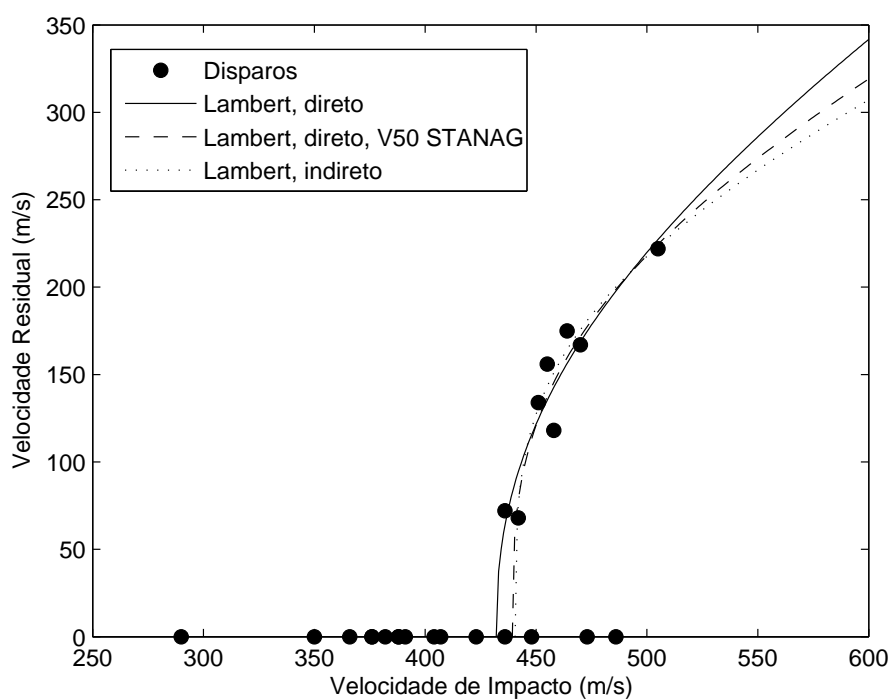
Figura 5.6: Fotografias da placa *sandwich* EN30: (a) vista anterior; (b) vista posterior.

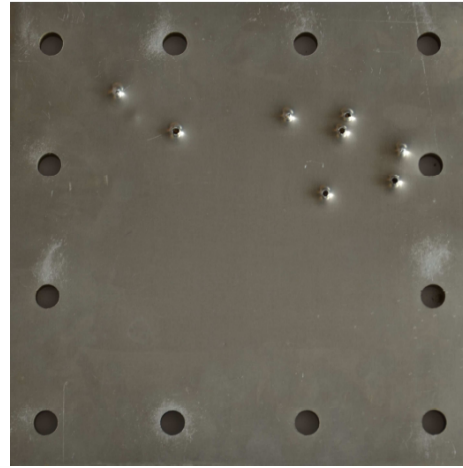
Figura 5.7: Velocidade residual em função da velocidade de impacto EN30.

Por fim, são apresentados os resultados da placa *sandwich* com espessura do micro-aglomerado de cortiça de 30 mm e de o núcleo de micro-aglomerado com maior densidade (TB40). Na figura 5.10 estão ilustradas duas fotografias da mesma placa (vista anterior e vista posterior).

Na tabela 5.5 são apresentados os resultados do impacto e residual do projétil para a placa ET30 com o resultado do impacto, ou com penetração completa ou parcial.



(a) Vista anterior da placa ET10.



(b) Vista posterior da placa ET10.

Figura 5.8: Fotografias da placa *sandwich* ET10: (a) vista anterior; (b) vista posterior.

Tabela 5.5: Velocidade do projétil e resultado da perfuração do alvo para a placa ET30.

V_i [m/s]	Perfuração	V_r [m/s]
455	PP	—
606	CP	211
534	PP	—
523	CP	116
561	CP	117
542	CP	93
554	CP	178
532	PP	—
536	CP	177
526	CP	84
520	PP	—

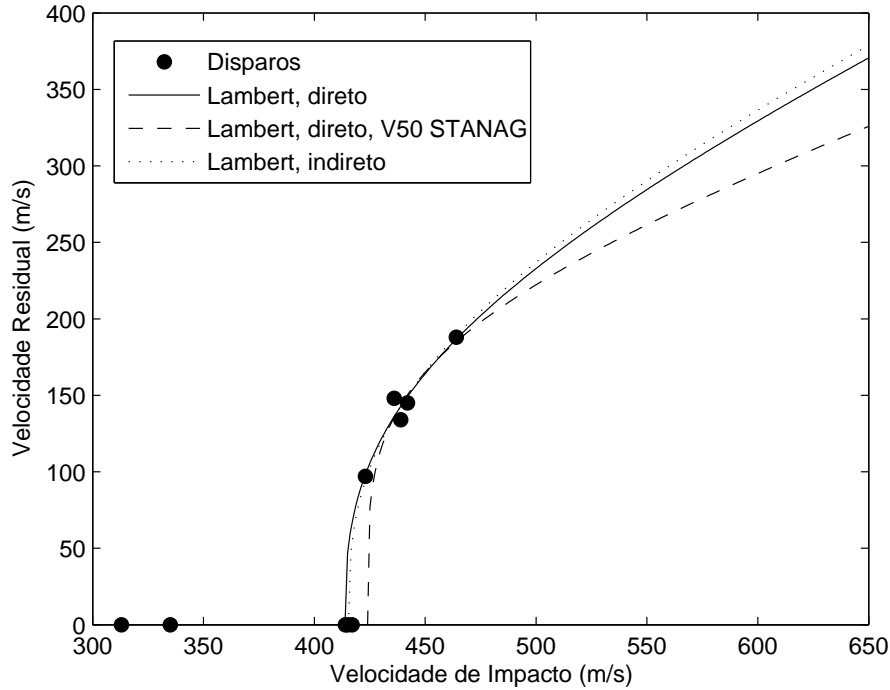


Figura 5.9: Velocidade residual em função da velocidade de impacto ET10.

As funções obtidas pelo método de Lambert estão apresentadas no gráfico da figura 5.11.

Uma vez apresentados todos os resultados experimentais, foram calculadas as frações de energia absorvida (absorção de energia) por todas as placas, que se encontram listadas na tabela 5.6. Para a absorção de energia foi calculada primeiro a energia cinética do impacto E_{ci} e a energia cinética residual E_{cr} . Por fim calculou-se a fração de energia absorvida, \bar{E} , da seguinte forma:

$$\bar{E} = 100 \times \left(1 - \frac{E_{cr}}{E_{ci}} \right) \quad (5.2)$$

Pela análise dos resultados apresentados na tabela 5.6 pode concluir-se que a fração de energia absorvida pelas placas *sandwich* é significativa. Em todos os testes experimentais realizados a velocidade residual foi sempre muito inferior à velocidade de impacto.

Como apresentado anteriormente a velocidade limite balístico, para as três variantes do método de Lambert para o ensaio EN10 foi sempre inferior à velocidade limite balístico da placa *sandwich* EN30, como seria de esperar uma vez que a espessura do micro-aglomerado de cortiça aumentou para o triplo.

A título de exemplo, é possível comparar a velocidade de 455 m/s para o MAC NL20 onde se conclui que a fração de energia absorvida é superior para a espessura mais elevada. Para o MAC TB40, uma vez que não existe nenhuma velocidade de impacto do projétil igual não foi possível comparar a absorção de energia. No entanto, é seguro afirmar que quanto maior a espessura, para o mesmo micro-aglomerado de cortiça, maior será a sua energia absorvida. Também se pode afirmar que quanto maior a densidade maior será a absorção de energia.

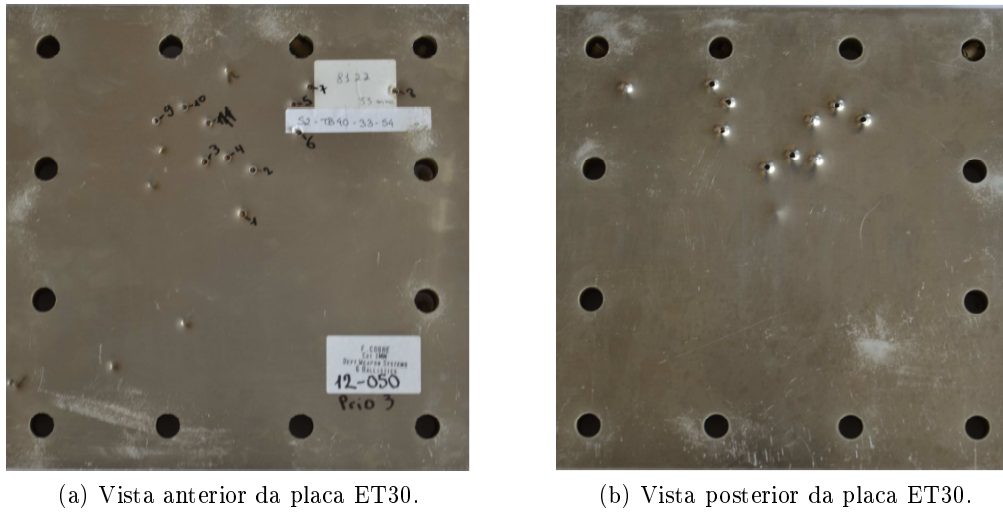


Figura 5.10: Fotografias da placa *sandwich* ET30: (a) vista anterior; (b) vista posterior.

Tabela 5.6: Energia absorvida por todas as placas com o projétil esférico.

Placa	V_i [m/s]	E_{ci} [J]	V_r	E_{cr} [J]	\bar{E} [%]
EN10	455	35,2	232	9,1	74,1
EN10	388	25,6	122	2,5	90,2
EN10	378	24,3	50	0,4	98,4
EN10	391	26	108	2	92,3
EN10	395	26,5	91	1,4	94,7
EN30	451	34,6	134	3,1	91
EN30	464	36,6	175	5,2	85,8
EN30	436	32,3	72	0,9	97,2
EN30	458	35,6	118	2,4	93,3
EN30	455	35,2	156	4,1	88,4
EN30	505	43,3	222	8,4	80,6
EN30	442	33,2	68	0,8	97,6
EN30	470	37,5	167	4,7	87,5
ET10	464	36,6	188	6	83,6
ET10	442	33,2	145	3,6	89,2
ET10	436	32,3	148	3,7	88,5
ET10	423	30,4	97	1,6	94,7
ET10	439	32,8	134	3,1	90,5
ET30	606	62,4	211	7,6	87,8
ET30	523	46,5	116	2,3	95,1
ET30	561	53,5	117	2,3	95,7
ET30	542	49,9	93	1,5	97
ET30	554	52,2	178	5,4	89,7
ET30	536	48,8	177	5,3	89,1
ET30	526	47	84	1,2	97,4

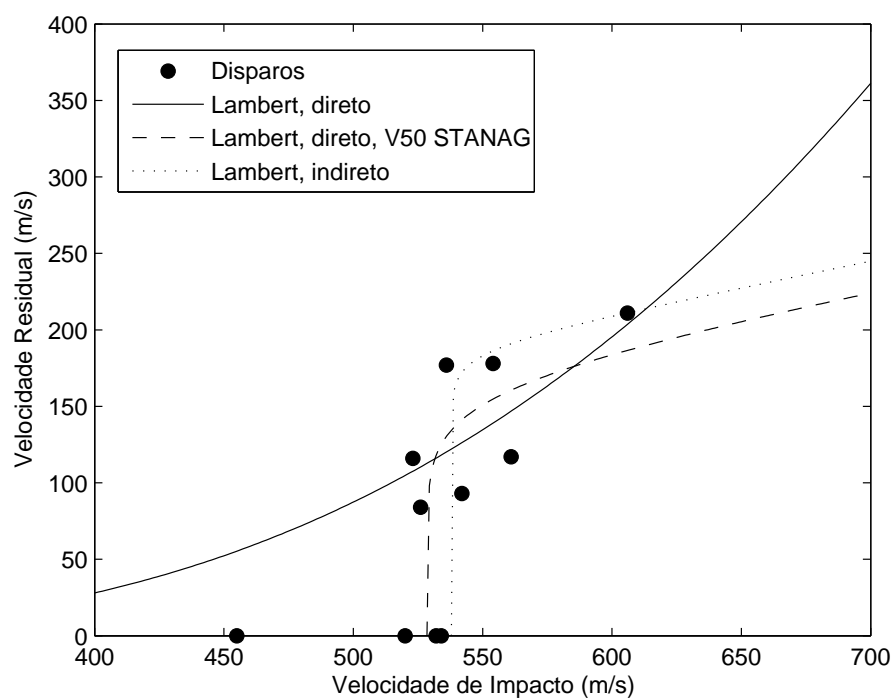


Figura 5.11: Velocidade residual em função da velocidade de impacto ET30.

Parte III

Modelação Numérica

Capítulo 6

Procedimentos e Métodos

Neste capítulo descreve-se de forma genérica o Método dos Elementos Finitos, utilizado no âmbito desta dissertação. É também descrito o modelo desenvolvido e implementado para testar o impacto de projéteis em placas *sandwich* com núcleos de micro-aglomerado de cortiça. As simulações são realizadas de acordo com especificações pré-definidas, isto é, realizam-se simulações para diferentes espessuras do micro-aglomerado e para dois tipos distintos de projétil. Definem-se os modelos geométricos das placas, o modelo de material, os contactos utilizados, as condições de simetria e de fronteira, e outras condições para a obtenção de resultados numéricos.

6.1 Método dos Elementos Finitos

No início do processo de modelação são identificados os fatores que influenciam de forma relevante o problema. Tal implica uma escolha criteriosa dos princípios físicos e das variáveis dependentes e independentes que descrevem o problema, resultando num conjunto de equações diferenciais, ou seja, no modelo matemático. Na fase seguinte do processo é necessário encontrar a solução matemática do modelo, utilizando métodos numéricos.

A modelação, o pré-processamento e a análise do ensaio numérico do desempenho balístico de sistemas de proteção com núcleos de micro-aglomerados de cortiça (MAC) foram realizados recorrendo ao método dos elementos finitos e, em particular, ao programa LS-DynaTM. É neste programa de simulação numérica que se define a geometria do problema, as condições de fronteira e contactos, modelos de comportamento de material e todos os parâmetros de modelação do ensaio numérico.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) teve origem na análise estrutural, em meados do século XX. Este método consiste na modelação de um problema genérico que envolve meios contínuos, para os quais é possível obter uma descrição matemática do seu comportamento (Teixeira-Dias et al., 2010).

O LS-DynaTM é um programa de simulação numérica desenvolvido pela *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC), que contém diversas possibilidades de cálculo de problemas reais complexos e baseia-se na análise de elementos finitos com integração temporal explícita. O LS-DynaTM tem vindo a ser muito utilizado por diversas indústrias tais como, por exemplo, a automóvel, a aeroespacial, a civil, a mecânica, a militar, de defesa, e a bioengenharia.

Este programa de simulação numérica permite resolver problemas dinâmicos, quase-

estáticos e estáticos, simulações bi- e tridimensionais, análises térmicas, de mecânica de fluidos, de fratura, *etc.*

6.2 Modelos de elementos finitos do alvo

De forma a validar os ensaios experimentais realizados e apresentados na parte dos Testes Reais desta dissertação, bem como os modelos implementados no âmbito deste trabalho, quer relativamente ao alvo quer em relação ao projétil, foram efetuadas diversas simulações numéricas, com o objetivo de estudar o efeito balístico de sistemas de proteção com núcleos de micro-aglomerado de cortiça (MAC).

A geometria das placas quadradas implementada com 320 mm de lado, foram modeladas no LS-DynaTM (versão 971), que permite desenhar a geometria pretendida. A modelação de todas as placas, quer as de alumínio, a de aço balístico ou as de MAC, têm como base o mesmo modelo bidimensional, diferindo apenas na espessura.

As simulações apresentadas neste trabalho são apenas de metade do modelo, uma vez que existe simetria. Devido aos modos de vibração presentes nas placas deveria ter-se utilizado o modelo completo, uma vez que apenas com metade do modelo se perde o registo de alguns dos modos de vibração. No entanto, prescindiu-se do registo dos modos de vibração visto que, com o modelo completo, aumentaria consideravelmente o tempo de simulação.

Sendo o alvo o componente estrutural de maior importância em todo este trabalho, uma vez que é o seu desempenho que está a ser avaliado, torna-se conveniente desenvolver malhas de elementos finitos adequadas às condições e geometria (espessura), a serem utilizadas nas simulações. Consequentemente, no alvo optou-se por realizar três zonas com refinamento de malha distintas: (i) uma região mais refinada, localizada na zona de impacto do projétil, (ii) uma zona intermédia, com malha menos refinada do que na zona anterior para que a transição não seja muito brusca uma vez que ainda existe interferências de tensão, e (iii) a restante área do alvo, menos refinada, uma vez que os gradientes de deformação e tensão esperados são menos significativos. Na figura 6.1 encontra-se representada a malha de elementos finitos utilizada em todo o trabalho, onde se pode verificar que aumenta o número de elementos à medida que nos aproximamos da zona de impacto do projétil.

O modelo de comportamento utilizado para a cortiça foi o modelo `*MAT_HONEYCOMB`. A utilização deste modelo prende-se com o facto de ser dedicado a materiais do tipo *honeycomb* (favo de abelha) e materiais celulares em geral, com comportamento anisotrópico. Este modelo considera que o coeficiente de Poisson do material é nulo. Os parâmetros que é necessário definir são: a massa volúmica ρ , o módulo de elasticidade E e a curva de comportamento tensão-deformação do material celular. Adicionalmente, é ainda necessário definir o módulo de elasticidade E' , a tensão limite de elasticidade σ_y e o coeficiente de Poisson ν do material compacto (denso). Para este modelo, o módulo de elasticidade varia desde o seu valor inicial até ao valor do material totalmente compactado. Considera-se que esta variação é linear com volume relativo¹ (Hallquist, 1993). O último parâmetro que é necessário definir corresponde à deformação máxima que o material celular pode sofrer antes que ocorra a rotura. Em termos numéricos, este parâmetro indica o valor a partir do qual os elementos são eliminados no modelo de simulação. Na

¹Relação entre o volume atual do material e o seu volume inicial.

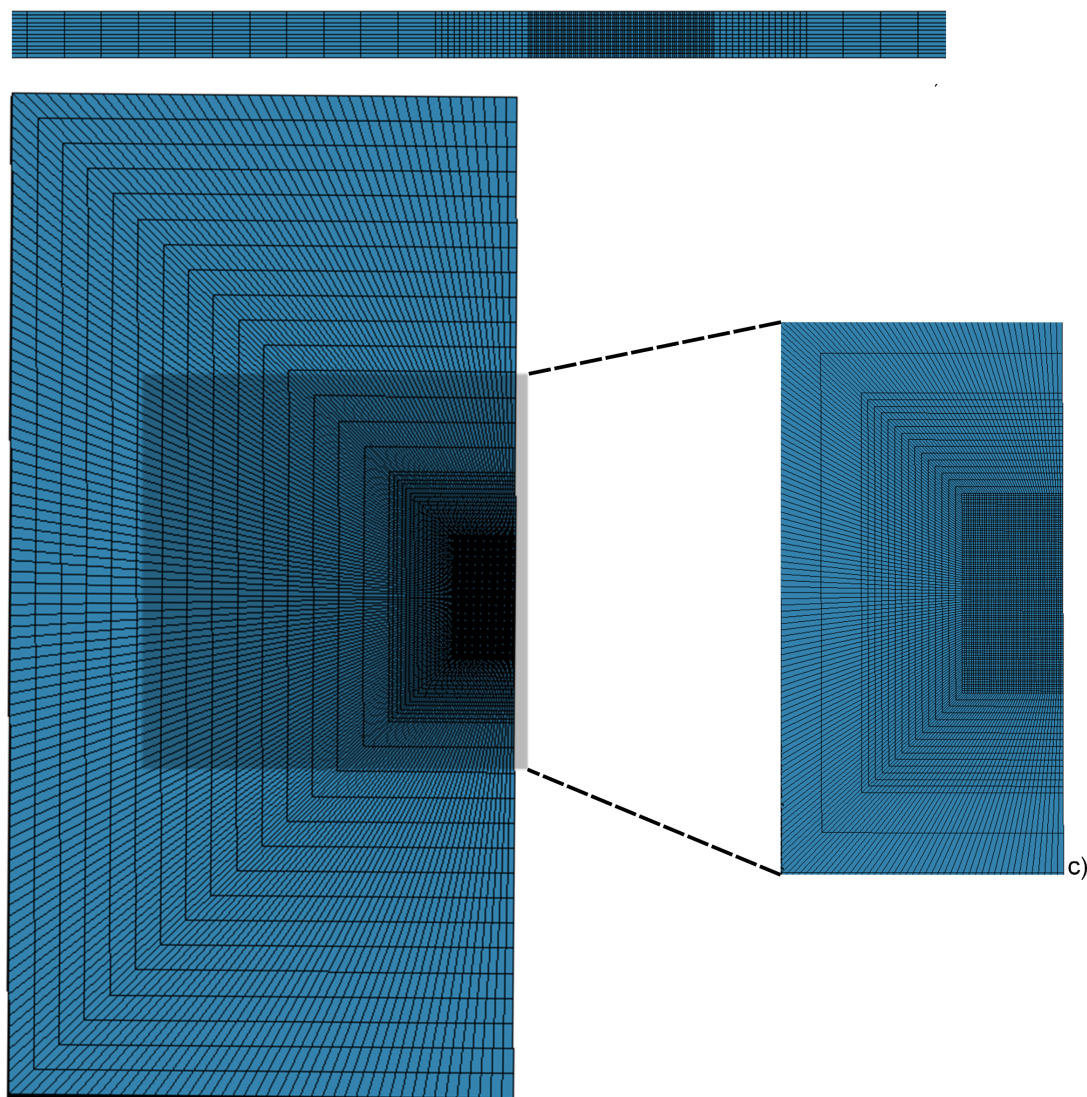


Figura 6.1: Representação esquemática da malha de elementos finitos utilizada na discretização do alvo: (a) vista completa do alvo; (b) refinamento da malha em espessura e (c) ampliação das zonas refinadas.

tabela 6.1 são apresentados os parâmetros do modelo de comportamento da cortiça para os dois micro-aglomerados utilizados neste trabalho (Amorim, 2012).

As curvas de comportamento tensão-deformação dos micro-aglomerados NL20 e TB40 encontram-se representadas no gráfico da figura 6.2. São apresentadas as curvas em regime estático e dinâmico. As curvas dinâmicas foram obtidas através de um fator multiplicativo determinado por Gameiro (Gameiro et al., 2007a)(Gameiro et al., 2005) (Gameiro et al., 2007b)(Sousa-Martins et al., 2012). Estes autores concluíram que, no caso dos micro-aglomerados de cortiça, existe uma relação de proporcionalidade aproximada entre o comportamento estático e dinâmico, quer para a parte elástica quer para a parte plástica. Assim, obtiveram-se fatores multiplicativos otimizados e a curva de NL20

Tabela 6.1: Propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico (Amorim, 2012) (220, 2012) (Alloy, 2012) .

Propriedades Mecânicas	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	σ_y [GPa]	ν
NL20 Expandido	200	0,006	—	—
NL20 Denso	—	9	—	0,3
TB40 Expandido	440	0,0085	—	—
TB40 Denso	—	9	—	0,3
Alumínio	2,65	70	0,21	0,33
Aço Balístico	7,788	211	1,15	0,29
Aço 4337H	7,940	205	—	0,29

foi multiplicada por um fator de 1,85 e a curva TB40 foi multiplicada por um fator de 1,1.

Para as placas de alumínio, que são colocadas nas duas faces exteriores da cortiça, o modelo de comportamento utilizado foi o modelo ***MAT_PLASTIC_KINEMATIC**. Este é um modelo bi-linear elástico-plástico, que contém formulações que combinam isotropia com encruamento cinemático. Os parâmetros que são necessários definir são: a densidade do material, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a tensão limite de elasticidade. É também necessário definir o valor da deformação a partir da qual o elemento entrou em rotura. As propriedades referidas anteriormente são também apresentadas na tabela 6.1 (Alloy, 2012).

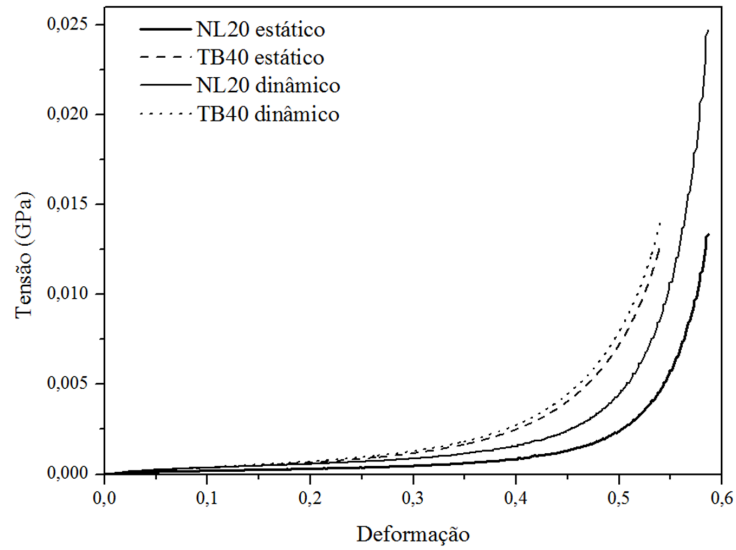
No que diz respeito à modelação numérica do alvo, os elementos finitos para a discretização da estrutura são elementos sólidos hexaédricos de oito nós, com três graus de liberdade por nó e um ponto de integração.

No primeiro conjunto de simulações, realizadas para validar o modelo de simulação realizado na análise experimental, foi colocada uma placa de aço balístico, como descrito anteriormente. O modelo de comportamento de material para este aço foi o ***MAT_PLASTIC_KINEMATIC**, o mesmo que o modelo de material das placas de alumínio. A espessura desta placa foi considerada sempre constante em todos os ensaios realizados, com valor de 8,5 mm. Na tabela 6.1 estão apresentadas as propriedades mecânicas do aço balístico utilizadas nas simulações numéricas (220, 2012).

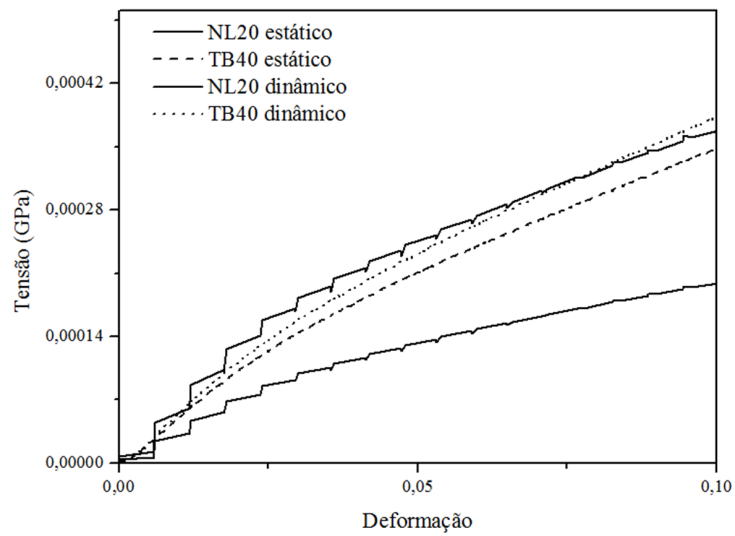
Foi também necessário determinar valores para a deformação e para a deformação angular (corte) a partir dos quais se considera que pode ocorrer a eliminação dos materiais de alumínio, cortiça micro-aglomerada NL20 e TB40 e do aço balístico (erosão de elementos finitos) de forma a simular a rutura dos materiais. Os valores foram obtidos por otimização numérica. No primeiro conjunto de simulações, realizadas com o projétil FSP, foi otimizado o valor da deformação ε_{Ac} , para o aço balístico e um valor de ε_{Al} para o alumínio, que é definido com base na redução da área da secção transversal quando a amostra de teste entra em rotura. Este valor foi obtido, com base na observação dos resultados experimentais. A relação utilizada para o cálculo destes valores limite de deformação é a seguinte:

$$\varepsilon = \left| \ln \frac{A_0}{A_0 + A} \right| \quad (6.1)$$

No caso da cortiça micro-aglomerada é necessário definir duas deformações, a de corte



(a) Curvas estáticas e dinâmicas dos MAC



(b) Ampliação do gráfico

Figura 6.2: Curvas de comportamento estáticas e dinâmicas do MAC: (a) completo; (b) detalhe da zona inicial das curvas.

Tabela 6.2: Valores de deformação de rotura dos materiais utilizados no modelo numérico.

Propriedades Mecânicas	ε_r	$\bar{\varepsilon}$	$\bar{\gamma}$
NL20	—	0,9	0,35
TB40	—	0,65	0,35
Alumínio	0,35	—	—
Aço Balístico	35	—	—

ou tangencial $\bar{\gamma}$, e a normal $\bar{\varepsilon}$. Os valores das duas deformações são diferentes, como seria de esperar, para os dois micro-aglomerados de cortiça. Na tabela 6.2 são apresentados os valores a partir dos quais ocorre erosão para o alumínio, o aço balístico e os compostos de cortiça micro-aglomerada. Pequenas alterações dos valores de deformação provocam grandes alterações nos resultados numéricos. Por este motivo foi extremamente exaustiva a escolha destes valores, uma vez que se combinou os valores para os diferentes materiais. Como se pode observar por análise da tabela 6.2, os valores das deformações para os dois micro-aglomerados é bastante diferente.

Devido à existência de grandes deformações no alvo na zona de impacto, há necessidade de usar um controlador que permite reduzir perturbações numéricas. As instabilidades, resultantes da existência de modos de energia nula, podem ser controladas através da ativação de controlo designado por `*CONTROL_HOURLASS`.

6.3 Modelos de elementos finitos do projétil

Para criar a malha de elementos finitos do projétil FSP (*fragment simulating projectiles*) utilizado nas simulações numéricas, utilizou-se o programa CAD/CAE *CATIA*. Foi necessário recorrer a este programa devido à geometria do projétil, uma vez que no programa LS-DynaTM é trabalhoso desenvolver modelos de formas geométricas complexas. Posteriormente, a geometria é importada num ficheiro IGES (extensão `*.IGS`) para o programa de simulação. Após esta importação recorreu-se à ferramenta *2D Mesh* do LS-DynaTM de modo a criar, tal como o nome indica, uma malha de elementos finitos bidimensionais do tipo casca. Após essa malha de elementos finitos bidimensional ter sido criada, geram-se elementos sólidos a partir dos elementos casca. Devido à simetria do modelo, foi também representada apenas metade do projétil FSP. Na figura 6.3a representa-se a malha de elementos finitos do projétil FSP.

Como foi referido anteriormente, o segundo projétil utilizado no trabalho foi um projétil esférico. Este foi desenhado no LS-DynaTM, pois a sua geometria é simples e, mais uma vez apenas é representado metade do projétil pois o problema apresenta simetria. Na figura 6.3b é apresentado o projétil esférico com a respetiva malha de elementos finitos.

O modelo de material escolhido para simular o comportamento dos projéteis foi o `*MAT_RIGID`. Este modelo define que o material não se deforma e requer os seguintes parâmetros: a densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Na tabela 6.1 são apresentadas as propriedades acima referidas.

A velocidade inicial dos projéteis FSP e esférico são definidos no *card* `*VELOCITY` do programa de simulação.

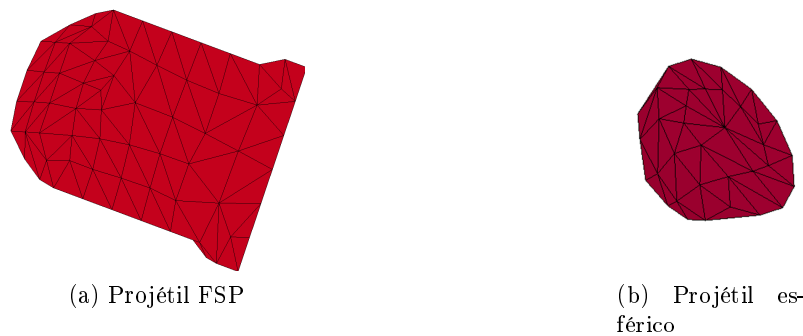


Figura 6.3: Representação esquemática da malha de elementos finitos utilizada na discretização: (a) do projétil FSP; (b) do projétil esférico.

6.4 Contactos e Condições de fronteira

A definição da forma como cada parte da simulação interage quando em contacto com outra parte é de extrema importância. Para tal, existem diversos modelos de contacto disponíveis na biblioteca do programa de simulação utilizado. Neste trabalho, em particular, é imediata a identificação de todas as partes que interagem entre si.

Em todas as simulações realizadas, quer com o projétil FSP quer com o projétil esférico, o contacto utilizado entre a placa *sandwich* e o projétil é do tipo `*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE`. Este é um contacto bastante utilizado em simulações de impacto balístico. Por norma este tipo de contacto é recomendado sempre que elementos sólidos, envolvidos na definição do contacto, estão sujeitos a um processo virtual de erosão (eliminação de material) devido a critérios de rutura de material.

Para a caracterização deste tipo de contacto é necessário seleccionar as superfícies *slave* e *master*. Esta escolha é realizada segundo a maior deformação, sendo escolhido normalmente o *slave* para a estrutura que sofre maior deformação. Consequentemente, o *master* é usualmente escolhido para a estrutura que sofre menos deformação. Também é necessário definir o modelo do contacto entre as placas de alumínio e o micro-aglomerado de cortiça, que simula o adesivo utilizado para colar ambas as partes. O contacto utilizado é do tipo `*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE`, sendo este contacto aplicado em materiais deformáveis. Como explicado anteriormente, o *master* (o que se deforma menos) é neste caso o alumínio e, consequentemente, o *slave* é o MAC. Este tipo de contacto permite fixar as partes da placa *sandwich* umas às outras.

No primeiro conjunto de simulações, onde o alvo além da placa *sandwich* tem também encostada uma placa de aço balístico, foi necessário definir um contacto do tipo `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` entre a placa *sandwich* e a placa de aço, de forma a garantir que não exista penetração entre as duas placas, a de aço balístico e a de alumínio.

De forma a tornar o sistema numericamente estável, fixam-se os nós correspondentes às zonas de apoio/fixação nos ensaios experimentais. Na figura 6.4 são apresentados os nós que foram bloqueados em todos os graus de liberdade, simulando assim a garra que foi utilizada nos testes reais. Na mesma figura também se apresentam os nós das duas faces exteriores do alumínio, que simulam o grampo utilizado. Restringiram-se todos os graus de liberdade destes nós, evitando assim a possibilidade quer de rotação quer de translação.

Devido à simetria do problema, como referido anteriormente, foi necessário aplicar condições de fronteira de simetria no plano médio do modelo, incluindo todas as placas e a respetiva munição. Na figura 6.5 é apresentado um exemplo de um modelo para melhor compreensão das condições de simetria aplicadas neste trabalho. Nestas condições de fronteira bloqueia-se a componente de deslocamento na direção Ox em todos os nós.

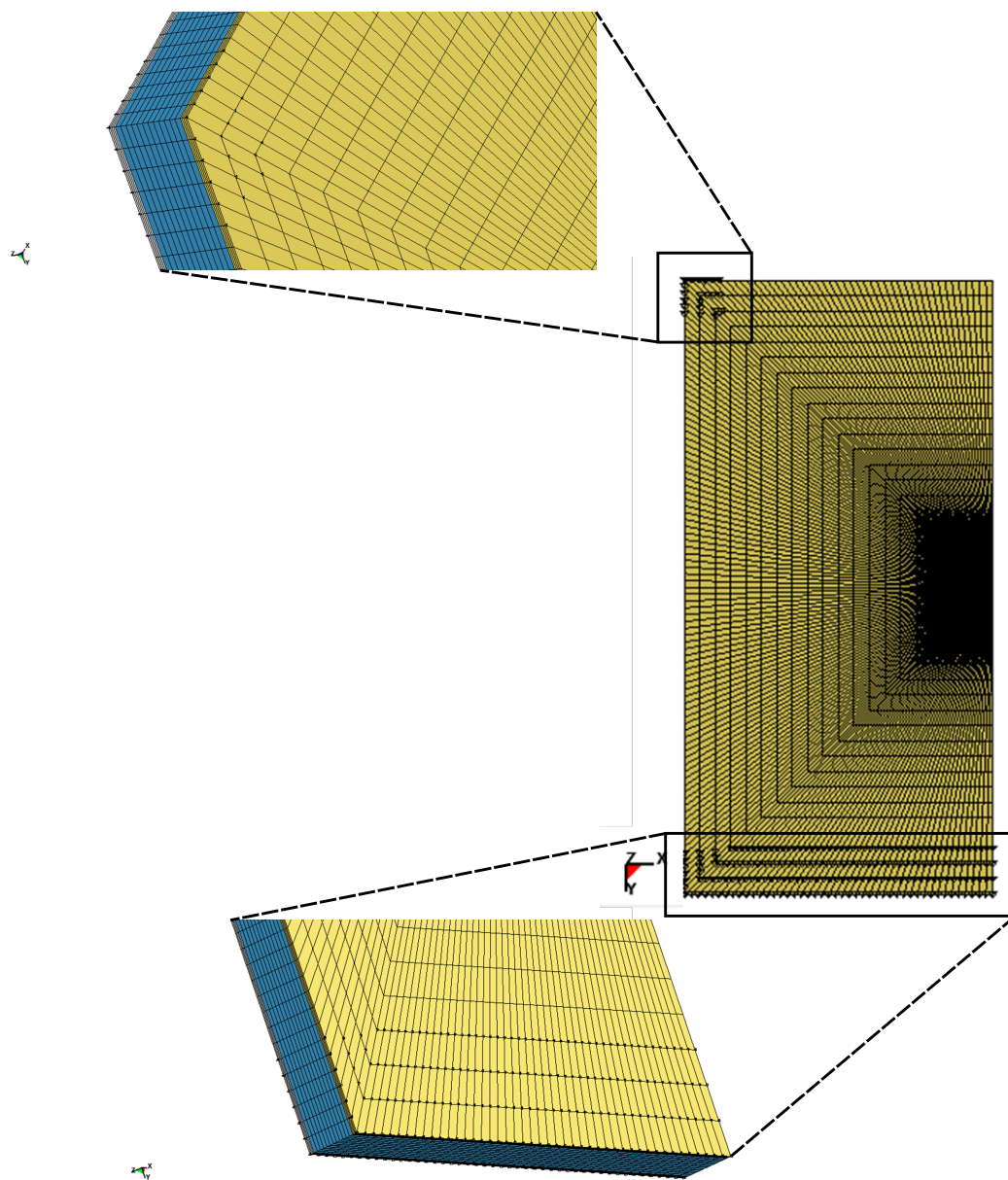


Figura 6.4: Representação das condições de fronteira do modelo numérico.

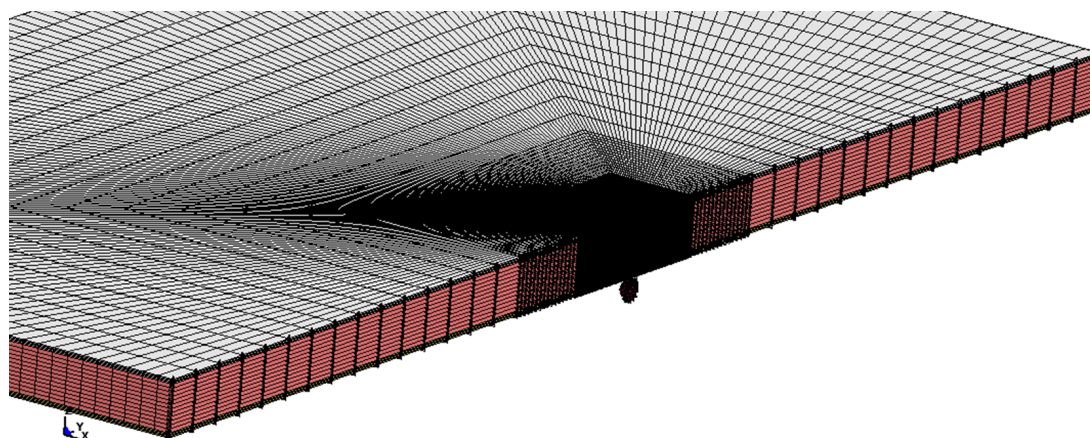


Figura 6.5: Representação das condições de simetria do modelo numérico.

Capítulo 7

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos numericamente através do programa de simulação utilizado ao longo deste trabalho. Apresenta-se uma análise detalhada da capacidade de absorção do alvo, com diferentes espessuras e diferentes densidades do micro-aglomerado de cortiça, que se encontram sujeitos a diferentes projéteis. Na primeira secção são mostrados os resultados numéricos obtidos para o projétil FSP. Na secção seguinte são apresentados e discutidos os resultados numéricos para os dois micro-aglomerados de cortiça com o projétil esférico.

7.1 Alvo: placa *sandwich* e aço balístico

Como referido anteriormente, neste trabalho foram apenas realizados testes experimentais e, conseqüentemente, simulações numéricas para o micro-aglomerado com menor densidade, designado por NL20. Nos parágrafos seguintes são apresentados os resultados das simulações para a espessura de 15 e 30 mm de micro-aglomerado de cortiça, onde o projétil utilizado foi um FSP. Na figura 7.1 é apresentado o gráfico da velocidade do projétil em função do tempo de simulação, onde se pode observar que o projétil atinge velocidade zero, ao fim de 0,083 ms, e que este não perfura a placa de aço balístico colocada do lado posterior da placa *sandwich*.

Na figura 7.2 mostra-se uma sequência de imagens da placa *sandwich* e a placa de aço balístico, FN15, para melhor compreensão dos resultados. Conclui-se através desta figura que o projétil não perfura completamente a placa *sandwich* como seria de esperar, com base nos resultados experimentais obtidos.

Para a placa *sandwich* com o micro-aglomerado NL20 com espessura de 30 mm os resultados obtidos numericamente estão apresentados na figura 7.3. É possível concluir que este projétil também não atravessa a placa de aço, como seria de esperar.

Para o projétil FSP não foram determinadas as velocidades residuais numéricas do projétil uma vez que não dispomos dos dados experimentais para o cálculo das mesmas, e assim não podemos comparar os resultados.

7.2 Alvo: placa *sandwich*

Com base nos resultados experimentais obtidos foram realizadas simulações numéricas onde o projétil esférico perfura completa ou parcialmente o alvo. Para que tal aconteça

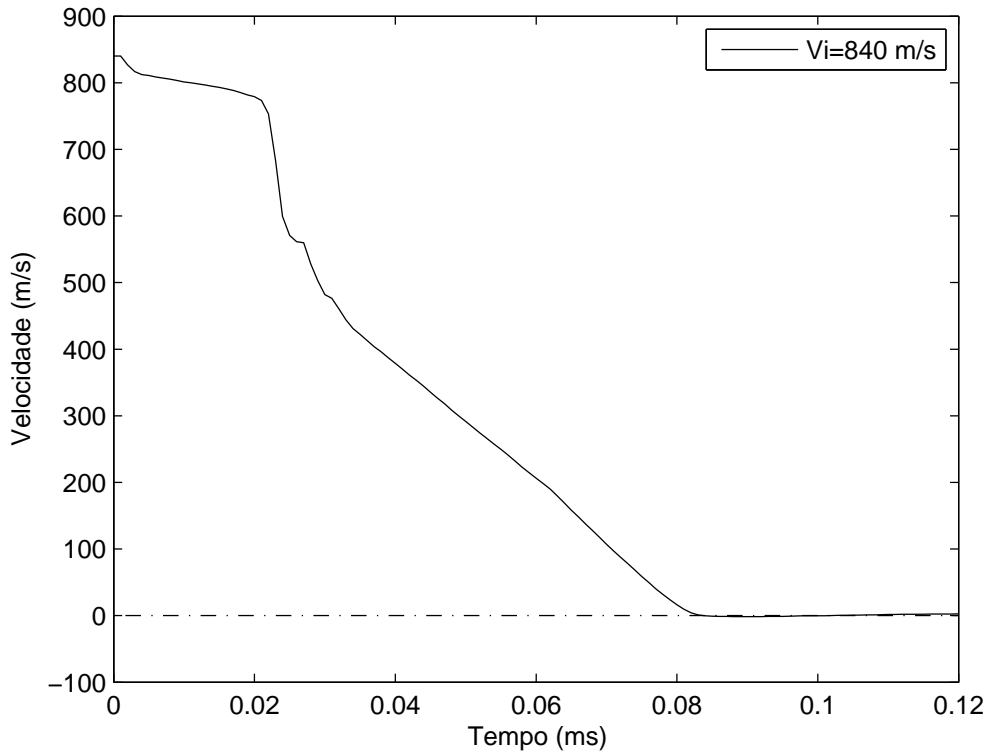


Figura 7.1: Velocidade do projétil em função do tempo para o modelo FN15.

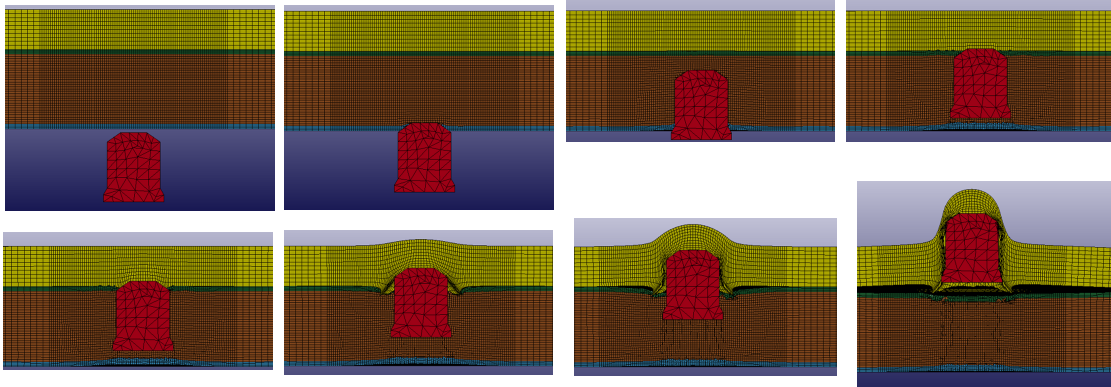


Figura 7.2: Sequência de imagens para o modelo FN15.

apenas foi alterado o valor da velocidade de impacto do projétil. Para o caso da placa *sandwich* EN10 é apresentado o gráfico da figura 7.4 da velocidade inicial em função do tempo de simulação para os dois casos: (i) o projétil atravessa completamente a placa *sandwich* e (ii) o projétil atravessa parcialmente a placa *sandwich*. Para determinação das velocidades iniciais de impacto utilizou-se uma velocidade inferior ao limite balístico V_{50} para o projétil perfurar parcialmente e uma velocidade superior ao limite balístico para o projétil perfurar completamente. Também é apresentado neste gráfico o valor da velocidade residual obtida experimentalmente através do método de STANAG Direto

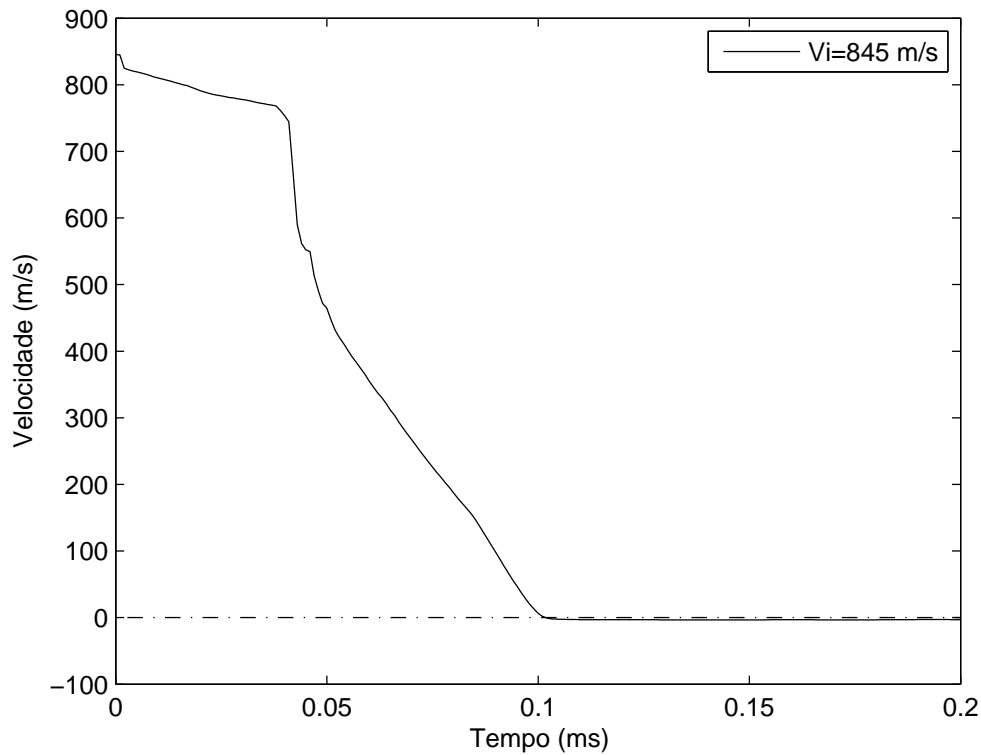


Figura 7.3: Velocidade do projétil em função do tempo para o modelo FN30.

para a obtenção do valor numérico. A equação relativa a este método para o caso da placa EN10 é a seguinte (ver equação 5.1):

$$V_r = a (V_i^p - V_{50}^p)^{1/p}$$

com os valores das constantes a , p e V_{50} indicados na tabela 7.1. Nesta tabela apresentam-se também os valores das velocidades de impacto V_i e da resultante velocidade residual V_r . Assim, para a velocidade de impacto $V_i = 380$ m/s obtém-se uma velocidade residual $V_r = 66,83$ m/s.

Tabela 7.1: Constantes e parâmetros utilizados para calcular a velocidade residual, de acordo com a equação 5.1.

Valor	EN10	EN30	ET10	ET30
a	0,909	0,617	0,523	0,325
p	1,933	3,154	4,234	7,785
V_{50} [m/s]	371,1	439,3	424,0	528,5
V_i [m/s]	380,0	445,0	430,0	540,0
V_r [m/s]	66,83	98,83	114,7	138,0

Como se pode observar por análise gráfica dos resultados numéricos, a velocidade, no caso em que a placa *sandwich* é perfurada parcialmente, assume valores negativos.

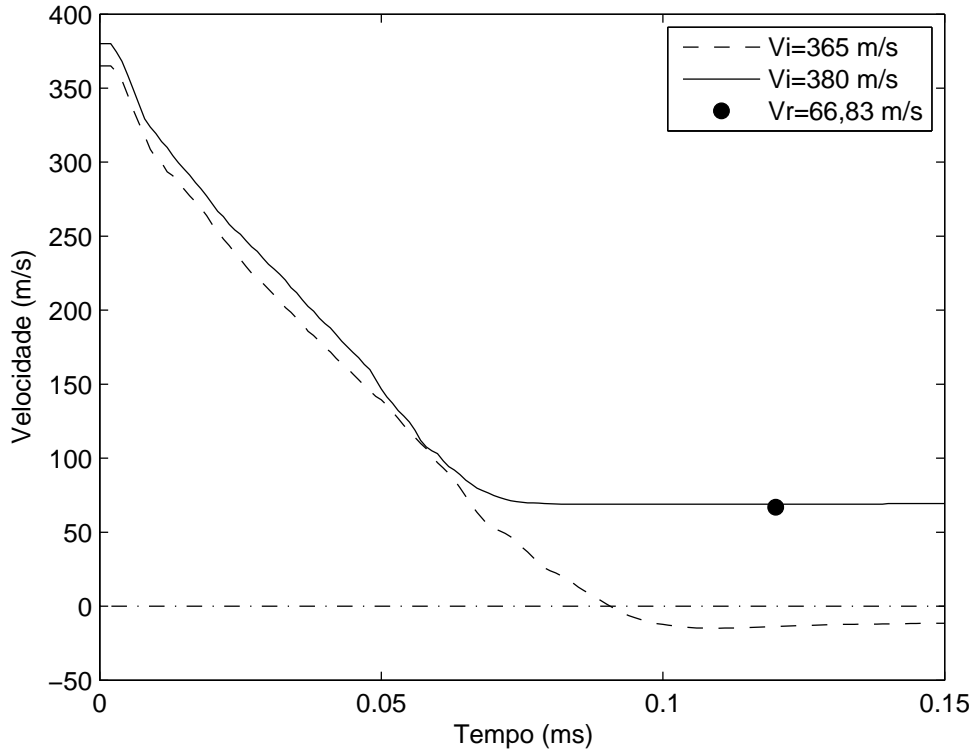


Figura 7.4: Velocidade do projétil em função do tempo para o modelo EN10.

Tal prende-se com o facto de os elementos serem eliminados (*element erosion*) à medida que ocorre perfuração da placa. Porém, quando o projétil atinge a velocidade zero a recuperação elástica da cortiça faz com que ele recue em sentido oposto, levando a que se registem valores de velocidade inferiores a zero. Na realidade tal não acontece uma vez que a cortiça, que não é eliminada, recupera elasticamente voltado a ocupar parcialmente o percurso da perfuração, impedindo o recuo do projétil.

Na figura 7.5 é apresentada uma sequência de imagens da evolução numérica para o micro-aglomerado de cortiça NL20 com espessura 10 mm onde o projétil esférico perfura completamente a placa *sandwich*.

Na figura 7.6 são apresentados os resultados obtidos numericamente para a placa de micro-aglomerado NL20 com espessura de núcleo de 30 mm. A velocidade residual foi mais uma vez obtida numericamente a partir da equação 5.1, com os parâmetros indicados na tabela 7.1, obtidos com base nos resultados experimentais. Neste caso, para a velocidade de impacto $V_i = 445$ m/s obtém-se uma velocidade residual $V_r = 98,83$ m/s.

Foram ainda realizadas simulações numéricas com um micro-aglomerado de cortiça de maior densidade (TB40) e foram estudados os mesmos parâmetros. No gráfico da figura 7.7 estão representados os resultados para o micro-aglomerado de maior densidade e de espessura 10 mm. Mais uma vez, as velocidades para o projétil perfurar completamente ou parcialmente foram encontradas com base no valor do limite balístico. A relação utilizada para calcular o valor da velocidade residual, com base nos resultados experimentais, é, mais uma vez, a relação 5.1, com os parâmetros indicados na tabela 7.1.

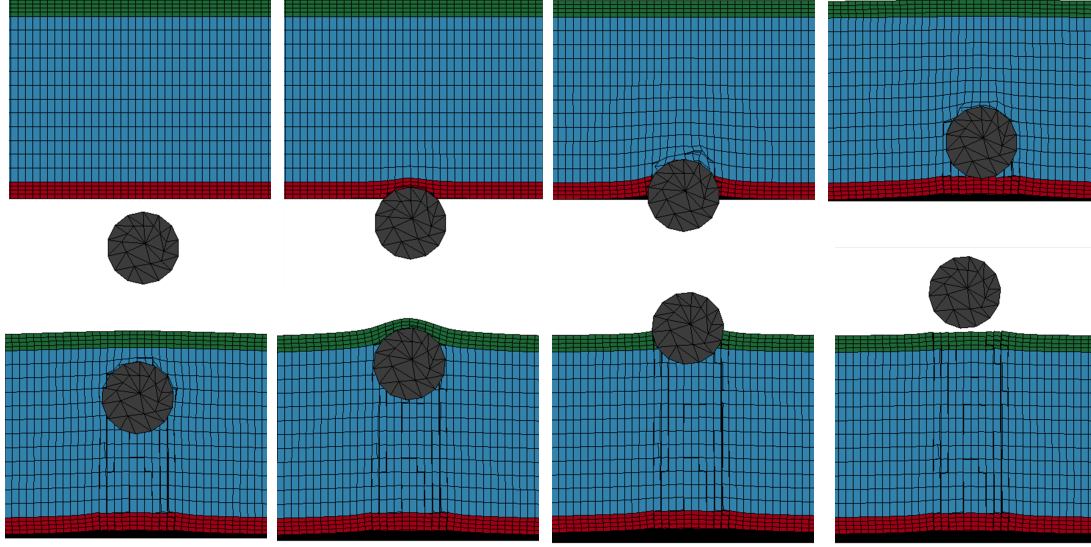


Figura 7.5: Sequência de imagens de perfuração para o modelo EN10 com velocidade inicial $V_i = 380$ m/s.

Neste caso, para a velocidade de impacto $V_i = 430$ m/s obtém-se uma velocidade residual $V_r = 114,7$ m/s.

Por análise dos resultados pode concluir-se que a velocidade residual obtida numericamente é bastante próxima do valor obtido experimentalmente.

O último ensaio numérico realizado corresponde ao micro-aglomerado TB40 (densidade 440 kg/m^3) de densidade e com uma espessura de 30 mm onde se obtiveram duas curvas de velocidade em função do tempo onde o projétil perfura parcial ou completamente o alvo. No gráfico 7.8 são apresentadas as curvas das velocidades. Para o cálculo da velocidade residual para a placa *sandwich* ET30 utilizou-se o método de STANAG direto com a relação 5.1, com os parâmetros indicados na tabela 7.1. Assim, para a velocidade de impacto $V_i = 540$ m/s obtém-se uma velocidade residual $V_r = 138,0$ m/s.

Com base nos gráficos apresentados anteriormente pode concluir-se que o limite balístico é menor para a espessura menor no caso da densidade de MAC de 200 kg/m^3 , a de menor valor utilizada neste trabalho.

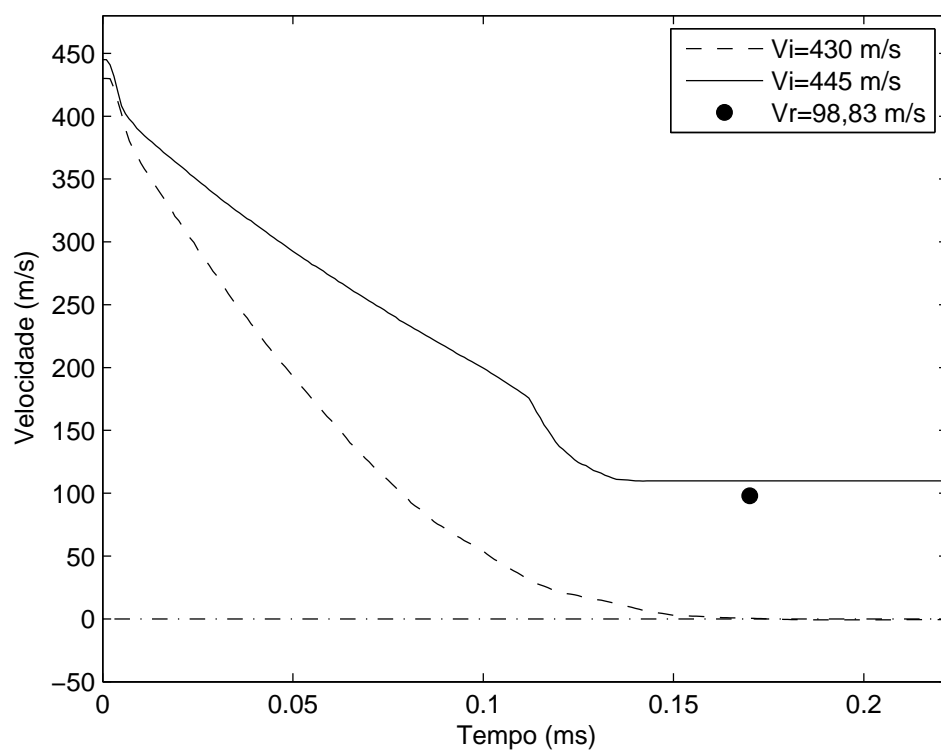


Figura 7.6: Velocidade do projétil em função do tempo para o modelo EN30.

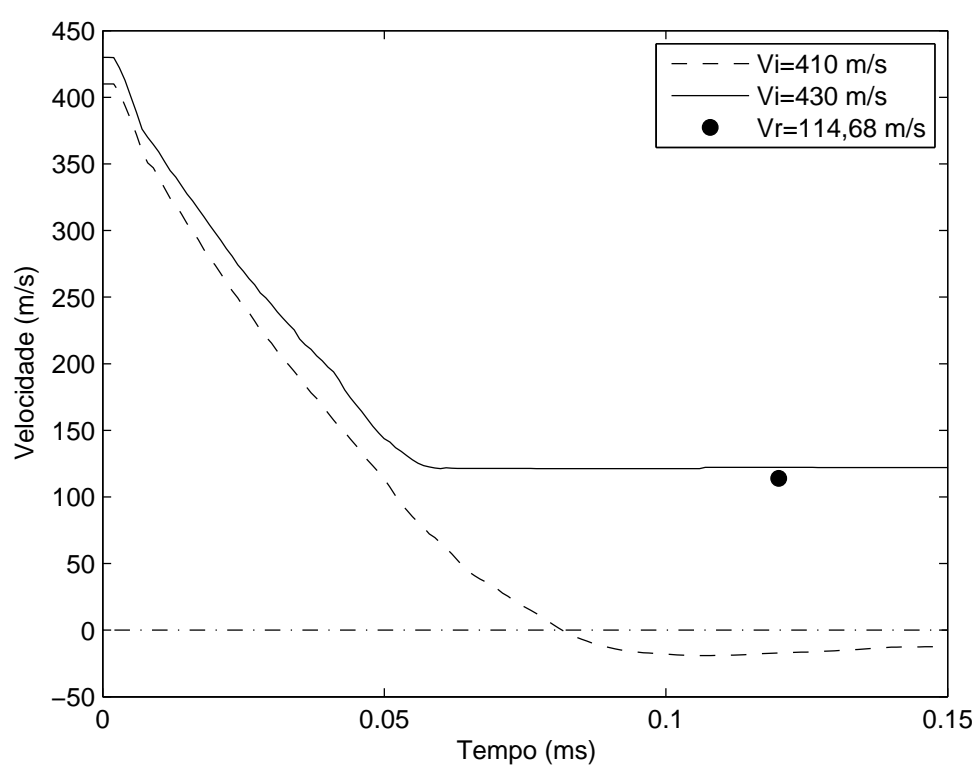


Figura 7.7: Velocidade do projétil em função do tempo para o modelo ET10.

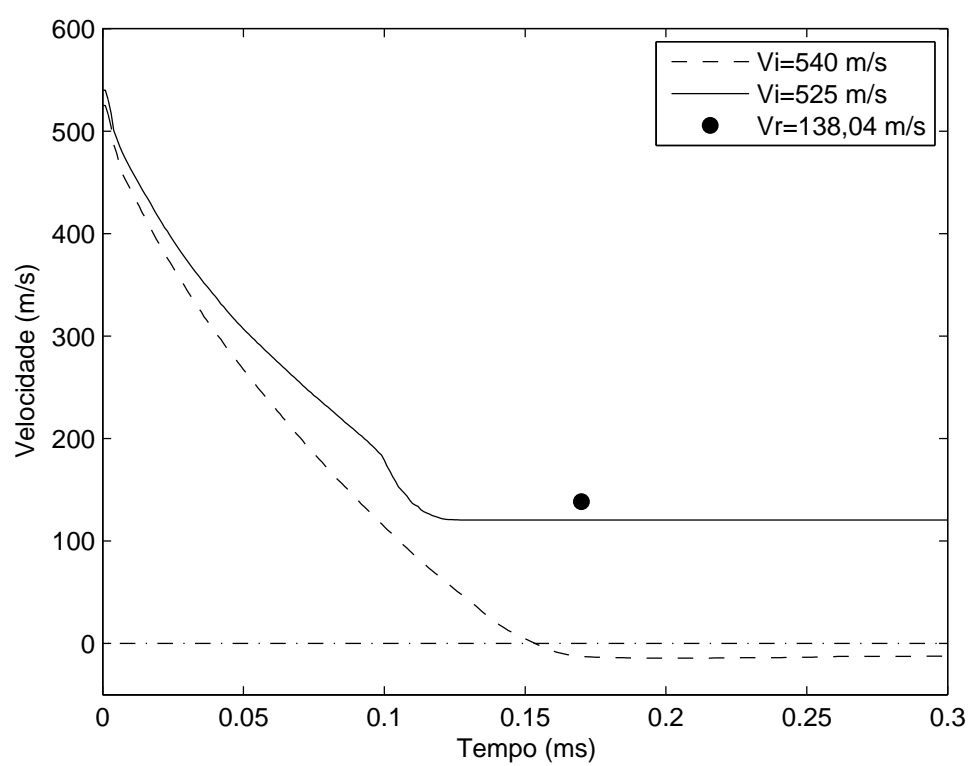


Figura 7.8: Velocidade do projétil em função do tempo para o modelo ET30.

Parte IV

Considerações Finais

Capítulo 8

Considerações Finais

Neste capítulo, o último desta dissertação, são apresentadas as conclusões gerais obtidas ao longo de todo o trabalho. O principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo do comportamento de sistemas tipo *sandwich* para proteção balística que incorporem núcleos de cortiça micro-aglomerada (MAC) com diversas densidades e diversas espessuras. Os modelos de comportamento dos materiais foram determinados por via experimental e implementados numericamente a partir de modelos analíticos.

8.1 Conclusões finais

Inicialmente foram realizados modelos numéricos com projéteis FSP (*fragment simulating projectiles*) para duas espessuras de micro-aglomerado com densidade $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$, sendo uma espessura o dobro da outra (15 e 30 mm). Estes modelos foram realizados com base nos testes reais e o limite balístico experimental — a velocidade V_{50} — foi obtido pelo método de STANAG.

Para a placa *sandwich* com 15 mm de espessura (modelo com referência FN15), o limite balístico determinado foi $V_{50} = 837,3 \text{ m/s}$. Por outro lado, para a placa *sandwich* com 30 mm de espessura (modelo com referência FN30) a velocidade limite balístico é $V_{50} = 841,1 \text{ m/s}$. A partir destes valores pode concluir-se que com o aumento da espessura do micro-aglomerado de cortiça o limite balístico também aumenta, como seria, aliás, de esperar. Para este projétil (FSP) não foi possível calcular a velocidade residual da placa *sandwich* pois além desta foi colocada uma placa de aço balístico que reteve a generalidade dos projéteis.

Consequentemente, com os modelos numéricos desenvolvidos para estes dois casos (FN15 e FN30) apenas foi possível verificar que o projétil não perfura completamente todo o alvo quando a velocidade é inferior ao limite balístico, assim como verificar que a deformação da placa de aço balístico é qualitativamente idêntica. Ou seja, pode apenas aferir-se que se valida parcialmente o modelo pois o projétil não perfurou completamente o alvo.

Nos testes reais em que se recorreu ao projétil esférico foram determinados os limites balísticos para os dois tipos de micro-aglomerado de cortiça (NL20 e TB40 com densidades de 200 kg/m^3 e 440 kg/m^3 , respetivamente), assim como a sua dependência da espessuras do núcleo da placa *sandwich*. O limite balístico V_{50} foi determinado por três variantes do método de Lambert, sendo que a abordagem mais utilizada neste trabalho

foi o método direto de STANAG, pois é o que apresenta melhores valores para o limite balístico.

Excetuando um disparo realizado experimentalmente, todos os disparos efetuados com o projétil esférico perfuraram a primeira placa de alumínio da estrutura *sandwich*. A maioria dos disparos provocaram perfuração na segunda placa de alumínio. A partir da discussão apresentada anteriormente pode concluir-se que a resistência balística dos painéis *sandwich* é, muito provavelmente, controlada na maior parte das vezes pela resistência das placas de alumínio e, apenas de uma forma secundária, pelo núcleo de micro-aglomerado de cortiça. A deformação da segunda placa de alumínio pode não ocorrer, pode ocorrer deformação ligeira, deformação pronunciada, deformação pronunciada com rotura/fratura e pode até ocorrer grande deformação da placa com perfuração total e formação de rolha (plug). Nenhuma das esferas de aço utilizadas como projétil apresentou sinal de deformação plástica. Por este motivo pode-se inferir que foi uma boa escolha do modelo de material para o projétil no programa de simulação utilizado ao longo deste trabalho.

Em todas as simulações numéricas realizadas apenas com a placa *sandwich* foram registados os perfis de velocidade em função do tempo bem como a variação da energia cinética do projétil, de modo a estimar a absorção de energia pelo alvo. O cálculo da absorção de energia foi obtido de forma numérica e experimental. Analisados os resultados das simulações numéricas para as placas com núcleos de MAC com densidade de 200 kg/m^3 e 440 kg/m^3 , em condições idênticas, verificou-se que quanto maior a densidade e também a espessura, maior é o limite balístico da placa correspondente.

Como seria de esperar, o alvo que apresenta um maior valor de energia absorvida é o alvo de micro-aglomerado de cortiça TB40 e 30 mm de espessura de núcleo para o impacto com o projétil esférico. Esta conclusão é facilmente retirada através do cálculo da média aritmética das percentagens de energia absorvida. Por outro lado, o alvo que apresenta a menor capacidade de absorção de energia é o que tem o núcleo de micro-aglomerado de cortiça com menor espessura (10 mm) e menor densidade (200 kg/m^3), uma vez que, quanto menor o volume de material, menor a energia absorvida pelo alvo.

No que diz respeito à velocidade, observa-se que a placa *sandwich* com a cortiça micro-aglomerada de maior densidade (TB40) oferece mais resistência à passagem do projétil do que o micro-aglomerado de cortiça de menor densidade (NL20).

8.2 Perspectivas e sugestões de trabalho futuro

Pela análise dos valores quantitativos de absorção de energia, verifica-se, de facto, que a aplicação de placas *sandwich* com núcleos de micro-aglomerado de cortiça pode servir como reforço a outros materiais e estruturas de proteção (como por exemplo blindagens de aço balístico), resultando em benefícios significativos em termos de proteção balística e peso das estruturas de proteção e blindagens. No entanto, existem ainda diversos parâmetros que podem vir a ser avaliados no seguimento deste estudo tais como, por exemplo, análise dos benefícios da implementação de micro-aglomerados com maior densidade e menor espessura ou até o estudo do impacto recorrendo a projéteis de maior energia.

No que diz respeito aos projéteis FSP e esférico, são apenas projéteis de teste em laboratório, como foi referido. Seria benéfico a realização de mais testes com diferentes

projéteis, testando com projéteis reais utilizados em cenários de defesa.

Terminada que está esta dissertação é útil referir algumas perspectivas de desenvolvimento futuro do trabalho que aqui foi descrito e apresentado.

Como facilmente se compreenderá, alguns dos aspectos observados durante o trabalho carecem de novas análises, distintas e/ou mais detalhadas, de uma maior investigação neste domínio de forma a tornar os aglomerados de cortiça cada vez mais competitivos no mercado global de soluções de engenharia.

Não coube no âmbito deste trabalho testar outros compostos de cortiça provenientes da Corticeira Amorim, de forma a compará-los com os aglomerados testados neste trabalho. Recomenda-se assim efetuar ensaios experimentais e posterior validação numérica com outros micro-aglomerados de cortiça (maior e menor densidade, diferentes tipos e tamanho de granulado, diferentes tipos de adesivo, *etc.*).

Conforme referido nos parágrafos anteriores, sugere-se ainda a realização de mais ensaios com diferentes projéteis, uma vez que o seu comportamento vai certamente diferir dos ensaios realizados com os projéteis utilizados ao longo deste trabalho, pois são, conforme se disse, projéteis de teste e de laboratório, com uma energia de impacto relativamente reduzida.

Lista de Tabelas

3.1	Características do projétil FSP	9
3.2	Características do projétil esférico utilizado neste trabalho.	9
4.1	Referências utilizadas nos ensaios com a respetiva designação.	24
5.1	Ensaio realizado para a placa <i>sandwich</i> e aço balístico com projétil FSP.	32
5.2	Velocidade de impacto,residual do alvo EN10.	34
5.3	Velocidade de impacto,residual do alvo EN30.	34
5.4	Velocidade de impacto,residual do alvo ET10.	35
5.5	Velocidade de impacto,residual do alvo ET30.	37
5.6	Energia absorvida por todas as placas com o projétil esférico.	39
6.1	Propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico (Amorim, 2012) (220, 2012) (Alloy, 2012)	
6.2	Valor das deformações.	48
7.1	Constantes da equação de Lambert.	55

Lista de Figuras

3.1	Desenho de definição do projétil FSP.	9
3.2	Representação esquemática dos modos de perfuração.	10
3.3	Exemplos de folhas de micro-aglomerado de cortiça.	15
3.4	Exemplo de placa <i>sandwich</i>	16
3.5	Modos de falha de placas <i>sandwich</i>	17
4.1	Representação da configuração experimental para o projétil FSP.	25
4.2	Fotografias dos diversos componentes da montagem experimental.	26
4.3	Representação da montagem experimental para o projétil esférico.	27
5.1	Fotografias da placa <i>sandwich</i> FN15.	31
5.2	Fotografias da placa <i>sandwich</i> FN30.	31
5.3	Limite balístico em função da espessura da placa <i>sandwich</i>	33
5.4	Fotografias da placa <i>sandwich</i> EN10.	33
5.5	Velocidade residual em função da velocidade de impacto EN10.	35
5.6	Fotografias da placa <i>sandwich</i> EN30.	36
5.7	Velocidade residual em função da velocidade de impacto EN30.	36
5.8	Fotografias da placa <i>sandwich</i> ET10.	37
5.9	Velocidade residual em função da velocidade de impacto ET10.	38
5.10	Fotografias da placa <i>sandwich</i> ET30.	39
5.11	Velocidade residual em função da velocidade de impacto ET30.	40
6.1	Representação esquemática da malha dos projéteis.	45
6.2	Curvas de comportamento (MAC) estáticas e dinâmicas.	47
6.3	Representação dos projéteis	49
6.4	Representação das condições de fronteira do modelo numérico.	51
6.5	Representação das condições de simetria do modelo numérico.	52
7.1	Velocidade do projétil em função do tempo para FN15.	54
7.2	Sequência de imagens para o modelo FN15.	54
7.3	Velocidade do projétil em função do tempo para FN30.	55
7.4	Velocidade do projétil em função do tempo para EN10.	56
7.5	Sequência de imagens de perfuração do modelo EN10.	57
7.6	Velocidade do projétil em função do tempo para EN30.	58
7.7	Velocidade do projétil em função do tempo para ET10.	59
7.8	Velocidade do projétil em função do tempo para ET30.	60

Bibliography

- 220, M. (2012). Mars® 220 medium hardness steel (440 HB) for blast protection.
- Alloy, A. A.-A. (2012). Amari aerospace-aluminium alloy 5754-H22 H24 H26.
- Amorim (2012). CORECORK® techical data.
- Andrew Ferriter, E., McCulloh, I. A., and deRosset, W. (1999). Techniques used to estimate limit velocity in ballistics testing with small sample size. *US Army Research Laboratory (ARL)*, pages 72–95.
- ARL (2006). PROJECTILE, CALIBERS .22, .30, .50, AND 20 mm FRAGMENT-SIMULATING.
- Azul, A. M. J. R. (2002). *Diversidade de fungos ectomicorrâzicos em ecossistemas de Montado*. PhD thesis.
- Bishop, R. F., Hill, R., and Mott, N. F. (1945). The theory of indentation and hardness tests. *Proceedings of the Physical Society*, 57:147–159.
- Broughton, W., Crocker, L., and Gower, M. (2002). Design requirements for bonded and bolted composite structures. *National Physical Laboratory Materials Centre, Teddington, Middlesex, UK*, page 65.
- Castro, O., Silva, J., Devezas, T., Silva, A., and Gil, L. (2010). Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials e Design*, pages 425–432.
- Costa, A., Madeira, M., and Oliveira, A. C. (2008). The relationship between cork oak growth patterns and soil, slope and drainage in a cork oak woodland in southern portugal. *Forest Ecology and Management*, 255(5-6):1525–1535.
- Costa, A., Pereira, H., and Oliveira, A. (2003). Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production. *Forest Ecology and Management*, 175(1-3):239–246.
- Demir, T., Ubeyli, M., and Yildirim, R. O. (2008). Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile. *Materials & Design*, 29(10):2009–2016.
- Forte, M., Rosa, M., and Pereira, H. (2004). *A cortiça*. IST Press, Lisboa.
- Fortes, M. A. and Rosa, M. E. (1992). Growth stresses and strains in cork. *Wood science and technology*, 26(4):241–258.

- Fortes, M. A. and Teresa Nogueira, M. (1989). The poison effect in cork. *Materials Science and Engineering: A*, 122(2):227–232.
- Gameiro, C. (2007). *Capacidade de absorção de energia de impacto de estruturas tubulares com cortiça confinada : estudo numérico e experimental*. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Gameiro, C., Cirne, J., Gary, G., Miranda, V., Pinho-da-Cruz, J., and Teixeira-Dias, F. (2005). Numerical and experimental study of the dynamic behaviour of cork. *Proceedings of the 3rd Light-Weight Armour Group Workshop: Design and Use of Light-Weight Materials*.
- Gameiro, C. P., Cirne, J., and Gary, G. (2007a). Experimental study of the quasi-static and dynamic behaviour of cork under compressive loading. *Journal of materials science*, 42(12):4316–4324.
- Gameiro, C. P., Cirne, J., Miranda, V., Pinho-da-Cruz, J., and Teixeira-Dias, F. (2007b). Dynamic behaviour of cork and cork-filled aluminium tubes: Numerical simulation and innovative applications. *Holzforschung*, 61(4):400–405.
- Gibson, L. J. and Ashby, M. F. (1999). *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge Univ Pr.
- Gibson, L. J., Easterling, K. E., and Ashby, M. F. (1981). The structure and mechanics of cork. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 377(1769):99–117.
- Gil, L. (1994). Effect of hot pressing densification on the cellular structure of black agglomerated cork board. *European Journal of Wood and Wood Products*, 52(2):131–134.
- Gil, L. (1996). Densification of black agglomerate cork boards and study of densified agglomerates. *Wood Science and Technology*, 30(3):217–223.
- Gil, L. (2007). A cortiça como material de construção — manual técnico.
- Gil, L. (2009). Cork composites: a review. *Materials*, 2(3):776–789.
- Gómez-Serrano, V. (2003). A study on the density of agglomerates prepared from cork wastes. *Journal of materials science and technology*, 19:46–50.
- Goodier, J. (1965). On the mechanics of indentation and cratering in solid targets of strain-hardening metal by impact of hard and soft spheres. *Proceedings of the 7th Symposium on Hypervelocity impact III. AIAA*, pages 215–259.
- Gouveia, M. (2001). Cortiça: uma indústria tradicional virada para o futuro.
- Grytten, F., Borvik, T., Hopperstad, O. S., and Langseth, M. (2007). On the Quasi-Static perforation resistance of circular AA5083-H116 aluminium plates.
- Grytten, F., Borvik, T., Hopperstad, O. S., and Langseth, M. (2009a). Low velocity perforation of AA5083-H116 aluminium plates. *International Journal of Impact Engineering*, 36(4):597–610.

- Grytten, F., Borvik, T., Hopperstad, O. S., and Langseth, M. (2009b). Quasi-static perforation of thin aluminium plates. *International Journal of Impact Engineering*, 36(3):486–497.
- Gupta, N. and Madhu, V. (1997). An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates. *International Journal of Impact Engineering*, pages 395–414.
- Hallquist, J. O. (1993). LS-DYNA3D theoretical manual. *Livermore software technology corporation*.
- Hill, R. (1950). The mathematical theory of plasticity. *Oxford University Press*.
- Iremonger, M. J. and Went, A. C. (1996). Ballistic impact of fibre composite armours by fragment-simulating projectiles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(7):575–581.
- João Teixeira, M., Fernandes, A. C., Saramago, B., Rosa, M. E., and Bordado, J. C. (1996). Influence of the wetting properties of polymeric adhesives on the mechanical behaviour of cork agglomerates. *Journal of adhesion science and technology*, 10(11):1111–1127.
- Librescu, L. and Hause, T. (2000). Recent developments in the modeling and behavior of advanced sandwich constructions: a survey. *Composite Structures*, 48(1-3):1–17.
- Manganello, J. and Abbot, K. (1972). Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of steel targets. *Journal Mater JMLSA*, pages 231–239.
- Mano, J. F. (2002). The viscoelastic properties of cork. *Journal of materials science*, 37(2):257–236.
- Mano, J. F. (2007). Creep-recovery behaviour of cork. *Materials Letters*, 61(11):2473–2477.
- Marat-Mendes, J. N. and Neagu, E. R. (2003). The study of electrical conductivity of cork. *Ferroelectrics*, 294(1):123–131.
- Nsiampa, N., Dyckmans, G., and Chabotier, A. (2007). Impact of 7.62 mm AP ammunition into aluminium 5083 plates. In *Proceedings of 23rd International Symposium on Ballistics Tarragona*.
- Paranacouros (2012). Paranacouros.
- Pereira, H. (2007). *Cork: biology, production and uses*. Elsevier Science.
- Pereira, H., Graça, J., and Baptista, C. (1992). The effect of growth rate on the structure and compressive properties of cork. *IAWA Bulletin*, 13:389–396.
- Pereira, H., Rosa, M., and Fortes, M. (1987). The cellular structure of cork from quercus suber. *IAWA Bulletin*, 8:213–218.
- Pina, P. and Fortes, M. A. (1996). Characterization of cells in cork. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29:2507.

- Rosa, M. E. and Fortes, M. A. (1988). Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. *Journal of materials science*, 23(3):879–885.
- Rosa, M. E. and Fortes, M. A. (1991). Deformation and fracture of cork in tension. *Journal of materials science*, 26(2):341–348.
- Rosa, M. E. and Fortes, M. A. (1993). Water absorption by cork. *Wood and fiber science*, 25(4):339–348.
- Sinha, P., Singh, I. P., and Ma, C. H. (1977). Effects of shock loading on the young modulus of alloy 2024 al. *Journal of Applied Physics*, 48(1):167–171.
- Soares, B. A. R. S. (2007). *Estruturas sandwich com utilização de núcleos de cortiça*. PhD thesis.
- Sousa-Martins, J., Kakogiannis, D., Coghe, F., Reymen, B., and Teixeira-Dias, F. (2012). Response of cork compounds subjected to impulsive blast loads. *The European Physical Journal Special Topics*, 206:61–70.
- Sousa-Martins, J. and Teixeira-Dias, F. (2011). Using natural cellular materials to improve blast-wave protection. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 2(2):165–178.
- STANAG, N. (2003). Norma STANAG 2920.
- Taylor, G. (1948). The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress. i. theoretical considerations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 194(1038):289–299.
- Teixeira-Dias, F., Cruz, J., Valente, R., and Sousa, R. (2010). *Método dos Elementos Finitos - Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*. Lidel - edições técnicas, lda., Lisboa, 1 edition.
- Thomson, W. T. (1955). An approximate theory of armor penetration. *Journal of Applied Physics*, 26(1):80–82.
- Vaz, M. F. and Fortes, M. A. (1998). Friction properties of cork. *Journal of materials science*, 33(8):2087–2093.
- Wambua, P., Vangrimde, B., Lomov, S., and Verpoest, I. (2007). The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles. *Composite structures*, 77(2):232–240.
- Warren, T. L. and Poormon, K. L. (2001). Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations. *International journal of impact engineering*, 25(10):993–1022.
- Woodward, R. L. (1977). A rational basis for the selection of armor materials. *J. Australas. Inst. Met.*, 5(4):167–170.